

Avancement d'un tunnelier mixte en région parisienne : retour d'expérience du duplex de l'A86

Progress of a dual mode TBM in the Paris region: feedback from the A86 duplex tunnel



Ce travail a fait l'objet d'un mémoire d'ingénieur CNAM spécialité Construction option Géotechnique soutenu le 18 décembre 2009 à la chaire de Géotechnique du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris.

This work was the subject of a CNAM engineer's dissertation specialising in Construction (Geotechnics option), presented on December 18, 2009 to the Chair of Geotechnics of the Paris Conservatoire National des Arts et Métiers.

1 - Bref rappel sur le projet

Le duplex de l'A86, dernier tronçon manquant de 10 km du super périphérique de l'A86, a été inscrit dès 1970 dans le schéma directeur d'Ile de France et a été déclaré comme étant un ouvrage d'utilité publique en 1995. Ce tunnel a coûté 2,2 milliards d'Euros. Le Maître d'œuvre, concepteur et constructeur, est SOCATOP (Société pour la Construction de l'Autoroute de Traversée de l'Ouest Parisien : SARL créée uniquement pour la durée du chantier). COFIROUTE (Compagnie Financière et Industrielle des Autoroutes) en est le concessionnaire jusqu'en 2086. Ce tunnel urbain de diamètre intérieur de 10,4 m comprend deux niveaux de

circulation superposés unidirectionnels à deux voies chacun et indépendants. Ce qui lui vaut l'appellation de « duplex A86 ». Il est réservé exclusivement aux véhicules légers dont la hauteur n'excède pas deux mètres. De ce fait, des véhicules de secours ont été spécialement construits pour cet ouvrage.

Il respecte la circulaire sur la sécurité des tunnels d'août 2000 suite à la catastrophe du tunnel du Mont-Blanc survenue le 24 mars 1999 avec ses sept puits de secours permettant l'accès depuis la surface, ses cinq unités de ventilation ainsi que ses refuges de sécurité avec escaliers de transferts inter niveaux situés tous les 200 m et ses niches de désenfumage mises en place tous les 400 m.

1 - Summary overview of the project

The A86 duplex was the last 10 km link required to complete the outer orbital A86 motorway. It had featured on the Ile de France Master Plan since 1970 and was recognised as a structure in the public interest in 1995. The tunnel cost €2.2 billion. The design/build project manager was SOCATOP (Société pour la Construction de l'Autoroute de Traversée de l'Ouest Parisien, a SARL limited-liability company created solely for the duration of the work-site. COFIROUTE (Compagnie Financière et Industrielle des Autoroutes) has the concession to operate it until 2086.

This urban tunnel, with an inner diameter of 10.4 m, comprises two independent levels of two-lane, one-way traffic running one above the other. This has led to it being known as the "A86 duplex". It is reserved exclusively for light vehicles with a maximum height of two metres. Consequently, special emergency vehicles were designed for use in this tunnel.

It complies with the circular on tunnel safety issued in August 2000 following the Mont-Blanc disaster of March 24, 1999, with seven emergency shafts providing access from the surface, five ventilation stations, safety shelters with stairs to move from one level to the other located every 200m, and smoke extraction stations located every 400 m.

1.1 - Le tracé

Le duplex de l'A86 (figure 1) relie Rueil-Malmaison (Hauts de Seine) à Vélizy (Yvelines) en passant à la verticale de neuf communes. La hauteur de recouvrement est comprise entre 8 et 78 m suivant une pente maximale de 4,5 %. Son tracé est approximativement Nord-Sud. Il est composé de deux tronçons séparés par un échangeur commun avec l'autoroute A13 à Vaucresson (figure 2). Le premier tronçon s'étend sur 4,5 km entre Rueil-Malmaison et l'A13. Le second tronçon relie l'autoroute A13 et Vélizy en 5,5 km.

1.2 - Le tunnelier

SOCATOP a commandé à HERRENKNECHT, un tunnelier « tout terrain » à confinement mixte (bi-mode : pression de terre ou boue bentonitique) de 11,56 m de diamètre extérieur, dont le bouclier est d'une longueur de 12 m et le train suiveur de 200 m. Son poids total (bouclier et train suiveur) est de 2400 tonnes. Sur la première remorque sont installés la cabine de pilotage, les ateliers d'approvisionnement de voussoirs, d'injection de bourrage, de pose de ventilation, et de marinage.

La partie du tunnelier creusant le terrain est une roue de coupe équipée d'outils de coupe et de molettes (figure 3) située à l'avant du bouclier. L'exécution du tunnel se fait par alternance de cycles de creusement de 2 m et de pose du revêtement où chaque anneau est constitué de huit voussoirs préfabriqués en béton armé de

2 m de largeur et 42 cm d'épaisseur. Ils sont acheminés par des trains sur pneumatiques, puis récupérés à l'avant par un érecteur qui les met en place à l'abri du bouclier. Après la mise en place d'un anneau, le tunnelier avance en prenant appui sur le dernier anneau posé au moyen de ses 42 vérins de poussée. Le vide restant entre le revêtement et l'excavation est comblé par un mortier de bourrage lors de l'excavation suivante. En mode boue, le transport en tunnel de

1.1 - The route

The A86 duplex (figure 1) links Rueil-Malmaison (Hauts de Seine) to Vélizy (Yvelines), running beneath nine municipalities. There is between 8 and 78 m of overburden and a maximum gradient of 4.5%. The route runs approximately from North to South. It comprises two sections separated by a junction with the A13 motorway at Vaucresson (figure 2).

The first section runs for a distance of 4.5 km between Rueil-Malmaison and the A13. The second section links the A13 motorway to Vélizy and runs for a distance of 5.5 km.

1.2 - The TBM

SOCATOP ordered an "all-terrain" dual-confinement 11.5m-external diameter TBM from HERRENKNECHT (a dual mode machine using either earth pressure balance (EPB) or bentonite slurry pressure balance (SPB)). The shield itself is 12m long and the follow train 200m. It has a total weight (shield plus follow train) of 2400 tonnes. The first section carried the control cabin and workstations to supply segments, inject grouting, install ventilation and carry out mucking. The excavation section of the TBM comprised a cutting wheel fitted with cutting tools and cutters (figure 3) located in front of the shield. Construction of the tunnel took place in alternating cycles: 2 m of excavation, followed by installation of the lining, in which each ring was composed of eight prefabricated reinforced concrete segments 2 m wide and 42 cm thick. These were brought on tyre-mounted trains and recovered by an erector that installed them, sheltered by the shield. Once a ring had been installed, the TBM advanced, bearing on that ring with its 42 hydraulic jacks. The space between the lining and the excavation was filled by grouting during the next phase of excavation.



Figure 1 - Situation générale du duplex de l'A86 / General location of the A86 Duplex tunnel.



Figure 3 - Roue de coupe du tunnelier mixte / Dual mode TBM cutting wheel.

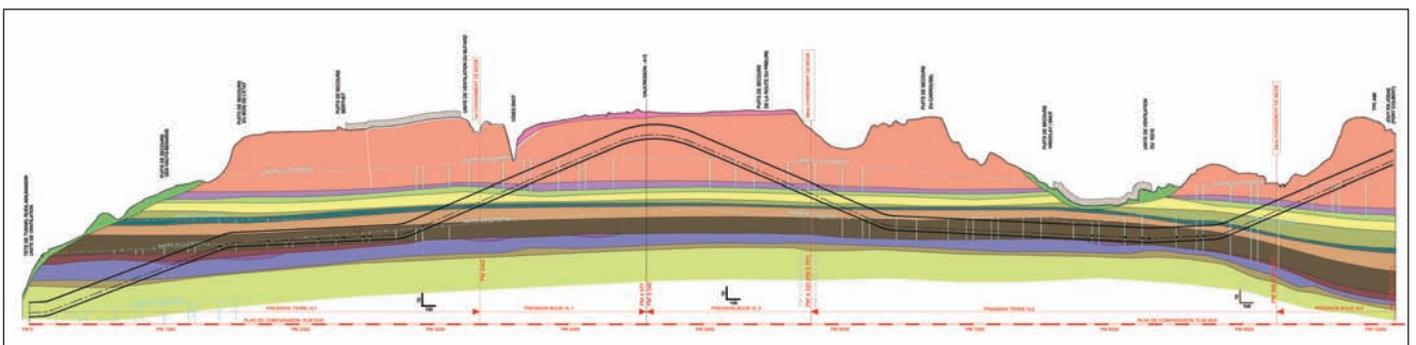


Figure 2 - Profil en long du Duplex de l'A86 formé de deux tronçons (VL1 et VL2) / Longitudinal profile of the two sections of the A86 Duplex (VL1 and VL2).

la boue d'alimentation et de la boue chargée des déblais s'effectue à l'aide de pompes et de conduites de marinage télescopiques jusqu'en surface vers l'usine de traitement des boues où la boue est régénérée. En mode terre, les déblais sont extraits hors de la chambre d'abattage à l'aide d'une vis de marinage, puis transportés par un convoyeur à bandes. Ils sont ensuite évacués vers une décharge soit par camion ou par barge. L'avancement moyen prévu du tunnelier mixte était de 80 ml par semaine en pression de terre dans les terrains cohérents, et 50 ml par semaine en pression de boue.

2 - Géologie et géotechnique des horizons traversés

2.1 - Géologie

Le duplex a été réalisé dans un sous-sol hétérogène (tableau 1) composé d'horizons géologiques tertiaires présents dans l'Ouest du bassin parisien et d'une formation du secondaire représentée par la craie du Crétacé supérieur (substratum). Le tunnel a été implanté préférentiellement dans le Calcaire grossier afin de bénéficier de ses bonnes caractéristiques géotechniques. Les terrains marno-calcaires représentent 70 % du volume foré et ont été rencontrés sur 7705 m et les terrains sableux constitués essentiellement de sables de Fontainebleau représentent 30 % du volume foré et ont été rencontrés sur 3405 m. Le tunnelier a creusé jusqu'à quatre horizons géologiques sur une même section de front de taille (fronts mixtes).

In SPB mode, the fresh slurry and slurry carrying debris was transported by means of telescopic mucking pipes from and to the surface, to a slurry treatment station where it was recycled. In EPB mode, debris was removed from the cutting chamber using a screw conveyor and then a conveyor belt. It was then removed to a disposal site by truck or barge.

The planned average rate of progress of the dual-mode TBM was 80 linear metres per week in EPB mode in consistent soil, and 50 linear metres per week in SPB mode.

2 - Geology and geotechnics of the horizons crossed

2.1 - Geology

The duplex was built in a heterogeneous subsoil (see table 1) consisting of tertiary geological horizons present in the west of the Paris basin, and a secondary formation, upper Cretaceous chalk, in the substratum. Wherever possible, the tunnel was located in the coarse limestone in order to make the most of its good geotechnical characteristics. Marl and limestone accounted for 70% of removed material and were encountered for a total of 7705 m. Sandy soil consisting mostly of Fontainebleau sandstone accounted for 30% of removed material, encountered for a total of 3405 m. The TBM excavated up to four geological horizons at once (mixed faces).

PÉRIODE / PERIOD	AGE	EPOQUE / EPOCH	ÉTAGE OU SOUS-ÉTAGE / STAGE OR SUBSTAGE	FORMATION	
CENOZOIQUE	10,0 ka 1,8 Ma	HOLOCENE		Remblai / <i>Backfill</i> Eboulis / <i>Talus</i> Alluvions modernes / <i>Modern alluvial deposits</i>	
		PLEISTOCENE	Würm Riss Mindel	Alluvions anciennes / <i>Old alluvial deposits</i> Limons des plateaux / <i>Plateau Loam</i> Loess / <i>Loess</i> Cailloutis de Sénart / <i>Sénart Gravel</i>	
	5,2 Ma 29,3 Ma	PLIOCENE MIOCENE		Sables de Lozère / <i>Lozère Sand</i>	
		32,0 Ma 35,4 Ma	OLIGOCENE	Stampien	Argiles de Montmorency / <i>Montmorency Clay</i> Sables de Fontainebleau / <i>Fontainebleau Sandstone</i> Marnes à Huîtres / <i>Oyster Marl</i>
	Sannoisien			Calcaire de Sannois / <i>Sannois Limestone</i> Argiles Vertes / <i>Green Clay</i>	
	38,0 Ma 35,0 Ma 42,0 Ma 50,0 Ma	EOCENE	Ludien	Marnes de Pantin / <i>Pantin Marl</i> Marnes d'Argenteuil / <i>Argenteuil Marl</i> Calcaire de Champigny / <i>Champigny Limestone</i>	
			Marinésien	Sables de Monceau / <i>Monceau Sand</i> Calcaire de Saint-Ouen / <i>Saint-Ouen Limestone</i>	
			Auversien	Sables de Beauchamp / <i>Beauchamp Sand</i>	
			Lutétien	Marnes et Caillasses / <i>Marl and Loam</i> Calcaire Grossier / <i>Coarse Limestone</i>	
			Cuisien	Sables de Cuise / <i>Cuise Sand</i>	
			Sparnacien	Fausses Glaises / <i>Fausses Glaises</i> Sables d'Auteuil / <i>Auteuil Sand</i> Argiles Plastiques / <i>Plastic Clay</i> Cendrier / <i>Clinker</i>	
	60,0 Ma 65,0 Ma	PALEOCENE	Dano-Montien	Marnes et Calcaires de Meudon / <i>Meudon Marl and Limestone</i>	
	MEZOZOIQUE	74,0 Ma 83,0 Ma	CRETACE SUPERIEUR	Campanien	Craie / <i>Chalk</i>

Les formations en gras sont rencontrées dans le projet du Duplex de l'A86 / The formations in bold are to be found in the A86 Duplex project.

Tableau 1 - Tableau synthétique des formations géologiques de la région parisienne / Summary table of geological formations in the Paris region.

2.2 - Propriétés géotechniques

Les paramètres géomécaniques des différents horizons géologiques rencontrés par le duplex sont récapitulés dans le tableau II. Il traverse des horizons très tendres à tendres, peu résistants et peu

abrasifs. Cependant, localement des hétérogénéités de faciès ont été rencontrées : passages résistants dans le calcaire grossier, les sables de Beauchamp (grès), voire très résistants dans le calcaire de Champigny (calcaire silicifié), et la craie (avec des rognons de silex jusqu'à 0,3 m).

2.2 - Geotechnical properties

A summary of the geomechanical parameters of the various geological horizons encountered by the duplex is shown in table II. The route crosses

resistance and abrasiveness. However, locally, heterogeneous facies were encountered: resistant areas in the coarse limestone, Beauchamp sand (sandstone) and even highly resistant sections in the Champigny limestone (siliceous limestone) and chalk (with chert nodules of up to 0.3 m).

FORMATION	C	Φ	E ₀	C'	Φ'	E _d	K ₀	v ₀ /v'	γ _h	Rc	Essai Cerchar Dureté / Hardness (Cerchar test)	Abrasivité
Sables de Fontainebleau / Fontainebleau Sandstone	0	35	50 +200 σ'vo	0	35	idem E0	0,4/0,6	0,25	19,1	x	x	x
MH/CS/AV	150/300	0	75/150	30	25	20/40	0,6/1,1	0,3/0,5	18,0/19,7	0,3 à 15,5 0.3 to 15.5	6 à 70 6 to 70	0,1 à 0,9 0.1 to 0.9
Marnes Supragypseuses / Supra-Gypsum Marl	180/400	0	90/200	0	30	20/40	0,7/1	0,3/0,5	18,5	60	16 à 50 16 to 50	0,1 à 0,4 0.1 to 0.4
Calcaire de Champigny / Champigny Limestone	200	30	300	200	30	200	0,5	0,3	23,7	2 à 130	2 à 200 2 to 200	0,1 à 2,3 0.1 to 2.3
Sables de Beauchamp / Beauchamp Sand	0	35	50/250	0	35	50/250	0,5	0,3	23,2	0,6 à 60	13 à 68 13 to 68	0,7 à 1,4 0.7 to 1.4
Marnes et Caillasses / Marl and Loam	100/200	25	150/300	75/150	30	100/200	0,6	0,3	24,0	0,1 à 30	3 à 200 3 to 200	0,1 à 2,0 0.1 to 2.0
Calcaire Grossier / Coarse Limestone	200/490	39/44	1600	200/490	39/44	600/1200	0,5	0,3	21,1	0,3 à 37	3 à 54 3 to 54	0,1 à 1,9 0.1 to 1.9
FG/SA	0	35	200/250	0	35	200/250	0,4/0,5	0,25	19,2	x	x	x
Argiles Plastiques / Plastic Clay	200/390	0	140/250	100	9	35/60	0,8/1,1	0,4/0,5	19,1	x	x	x
Marnes et Calcaire de Meudon / Meudon Marl and limestone	200	25	350	150	30	250	0,6	0,3	21,8	0,3 à 5,4 0.3 to 5.4	6 à 8 6 to 8	0,1
Craie / Chalk	Rc = 2 MPa		450	Rc = 2 MPa		250	0,5	0,3	19,6	1,1 à 3,1 1.1 to 3.1	2 à 7 à très élevée 2 to 7 very high	0,1

γ_h (kN/m³) : poids volumique humide / γ_h (kN/m³): unit weight of saturated soil

K₀ : coefficient de poussée des terres au repos / K₀: thrust coefficient of at-rest earth pressure

C (kPa) : cohésion à court terme, C' (kPa) : cohésion à long terme / C (kPa): undrained cohesion, C' (kPa): drained cohesion

Φ (°) : angle de frottement interne à court terme, Φ' (°) : angle de frottement interne à long terme / Φ (°)undrained internal angle of friction, Φ' (°): drained angle of friction

Rc : résistance à la compression simple / unconfined compressive strength

v₀ : coefficient de Poisson à court terme, v' : Coefficient de Poisson à long terme / v₀: undrained Poisson's ratio, v': Drained Poisson's ratio

E₀ (MPa) : module de déformabilité instantané, E_d : module de déformabilité différé / E₀ (MPa) : undrained deformation modulus, E_d: drained deformation modulus

σ'vo : contrainte moyenne au point considéré équivalent à la contrainte due au poids des terres min/max / mean stress at the point deemed to be equivalent to the stress due to the max/min soil load

x : Absence de donnée / No data

MH/CS/AV : Marnes à Huîtres, Calcaire de Sannois, Argiles Vertes ; FG/SA : Fausses Glaises/Sables d'Auteuil / Oyster Marl, Sannois Limestone, Green Clay; FG/SA: Fausses Glaises/Auteuil Sand

Tableau 2 - Synoptique des caractéristiques géomécaniques par formations (d'après le profil en long géologique établi par SOCATOP TE2 200 GEN GOL LOG E SVT 204001 B- et d'après SIMECSOL, 1996) / Summary of geomechanical characteristics for each formation (as per the longitudinal geological profile established by SOCATOP TE2 200 GEN GOL LOG E SVT 204001 B- and SIMECSOL, 1996).

2.3 - Hydrogéologie

Le duplex intercepte quatre nappes : dans les sables de Fontainebleau (nappe du Stampien), dans le calcaire de Champigny et les sables de

Beauchamp (nappe du Bartonien), dans les marnes et caillasses et calcaire grossier (nappe du Lutétien) et dans la craie et les alluvions (nappe du Campanien). Cette dernière n'a pas concerné la réalisation du second

2.3 - Hydrogeology

The duplex crosses four aquifers: in the Fontainebleau sandstone (Stampian aquifer), in the Champigny limestone and the Beauchamp sand

(Bartonian aquifer), in the marl and loam and coarse limestone (Lutetian aquifer) and in the chalk and alluvial sand (Campanian aquifer). The second section was not affected by the latter. The hydraulic load was less

NATURE DES TERRAINS / SOIL TYPE	Perméabilité / Permeability - k (m/ s)
Sables de Fontainebleau / <i>Fontainebleau Sandstone</i>	10^{-8} à 10^{-4}
Marnes à Huîtres / <i>Oyster Marl</i>	10^{-9} à $3,2 \cdot 10^{-6}$
Calcaire de Sannois / <i>Sannois Limestone</i>	?
Argiles Vertes / <i>Green Clay</i>	10^{-9}
Marnes Supragypseuses / <i>Supra-Gypsum Marl</i>	10^{-9} à $4,6 \cdot 10^{-6}$
Calcaire de Champigny / <i>Champigny Limestone</i>	10^{-9} à $1,1 \cdot 10^{-4}$
Sables de Beauchamp / <i>Beauchamp Sand</i>	$11,8 \cdot 10^{-8}$ à $6,10^{-6}$
Marnes et Caillasses / <i>Marl and Loam</i>	$2,10^{-9}$ à $9,7 \cdot 10^{-5}$
Calcaire Grossier / <i>Coarse Limestone</i>	10^{-9} à $3,10^{-4}$
Fausses Glaises / <i>Fausses Glaises</i>	$1 \cdot 10^{-9}$ à $7 \cdot 10^{-6}$
Sables d'Auteuil / <i>Auteuil Sand</i>	$9 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-5}
Argiles Plastiques / <i>Plastic Clay</i>	$1,5 \cdot 10^{-10}$ à $2,5 \cdot 10^{-9}$
Marnes et Calcaire de Meudon / <i>Meudon Marl and Limestone</i>	$2,8 \cdot 10^{-9}$ à $6 \cdot 10^{-8}$
Craie / <i>Chalk</i>	$1,8 \cdot 10^{-9}$ à $1 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3 - Perméabilité des terrains d'après les résultats des essais d'eau Lefranc (d'ap. SIMECSOL, 1996) / Soil permeability as shown by the results of Lefranc permeability tests (as per SIMECSOL, 1996).

tronçon. La charge hydraulique est inférieure à 20 m sur l'ensemble du tracé. Compte tenu de l'alternance des couches perméables et imperméables, le risque de communication entre les différentes nappes a été considéré comme étant infime.

Les perméabilités des terrains sont hétérogènes (tableau 3) : imperméables pour les argiles plastiques, très faibles pour la base des sables de Fontainebleau constituée de sables fins argileux et perméables dans le calcaire grossier. Ces hétérogénéités de perméabilité ont nécessité des modes de confinement différents (pression de boue bentonitique, pression de terre, air comprimé) lors du creusement du tunnel. Le mode de confinement retenu pour franchir les terrains stables et cohérents (marno-calcaires ou argilo-marneux) est le mode ouvert (sans confinement) ou le mode semi-fermé (air comprimé) pour réduire les venues

d'eau. Les sables de Fontainebleau présentant un caractère liquide sous-nappe et identifié comme la principale difficulté de ce chantier ont dû être confinés et ont été creusés en mode pression de boue bentonitique.

3 - Avancements du tunnelier (creusement 2000-2007)

Les cadences d'avancement au tunnelier avaient déjà été appréhendées en région parisienne. Le mode boue avait été mis en œuvre lors du forage des tunnels de Villejust (1986-1988). La ligne D du RER (1993-1994) et la liaison Cachan-Charenton (1996-1997) ont été creusées en mode terre. Le creusement du duplex de l'A86 a été décomposé en deux tronçons. Sur une semaine de travail, deux jours et demi étaient consacrés à la maintenance du

than 20 m for the whole of the route. Given the alternating permeable and impermeable layers, the risk of communication between the various aquifers was deemed to be negligible.

The permeability of the various soils is heterogeneous (table 3): impermeable for plastic clay, very low for the Fontainebleau sandstone at the base, consisting of fine clay sand, and permeable in the coarse limestone. The different levels of permeability called for different modes of confinement (slurry pressure balance, earth pressure balance, compressed air) during tunnel excavation works. The mode of confinement chosen to cross stable, consistent soil (marl and limestone or marly clay) was open mode (without confinement) or semi-closed mode (compressed air) to minimise water ingress. The Fontainebleau sands-

tone aquifer has a liquid consistency; this was identified as the main difficulty on this worksite. This sandstone had to be confined and excavated in bentonite SPB mode.

3 - Progress of the TBM (excavation from 2000-2007)

There was existing data about TBM rates of progress in the Paris region. SPB mode had already been used when drilling the Villejust tunnels (1986-1988). RER line D (1993-1994) and the Cachan-Charenton (1996-1997) link were excavated in EPB mode.

Excavation of the A86 duplex was split into two phases. During a working week, two and a half days were given over to TBM maintenance. The four and a half remaining days were

tunnelier. Les quatre jours et demi-restants étaient dédiés à la production 24h/24h (trois postes de huit heures).

3.1 - Premier tronçon du duplex de l'A86 (2000-2003)

Le creusement du premier tronçon du duplex a démarré le 23 novembre 2000 depuis Rueil-Malmaison, en mode pression de terre sur 3 350 m environ. Ensuite, le mode pression de boue a pris le relais en novembre 2002 sur les derniers 1150 ml jusqu'au percement à l'échangeur A13 fin octobre 2003. La section du premier tronçon traverse les horizons allant de la craie aux sables de Fontainebleau (figure 4). Les cadences d'avancement moyennes du tunnelier sont présentées en fonction des horizons géologiques présents au niveau du front de taille dans la figure 5.

• Principales difficultés

Des incidents exceptionnels ont interrompu le creusement du tunnel en mode pression de terre pendant près de cinq mois (pannes de train en 2001, grève du personnel ouvrier et écluser

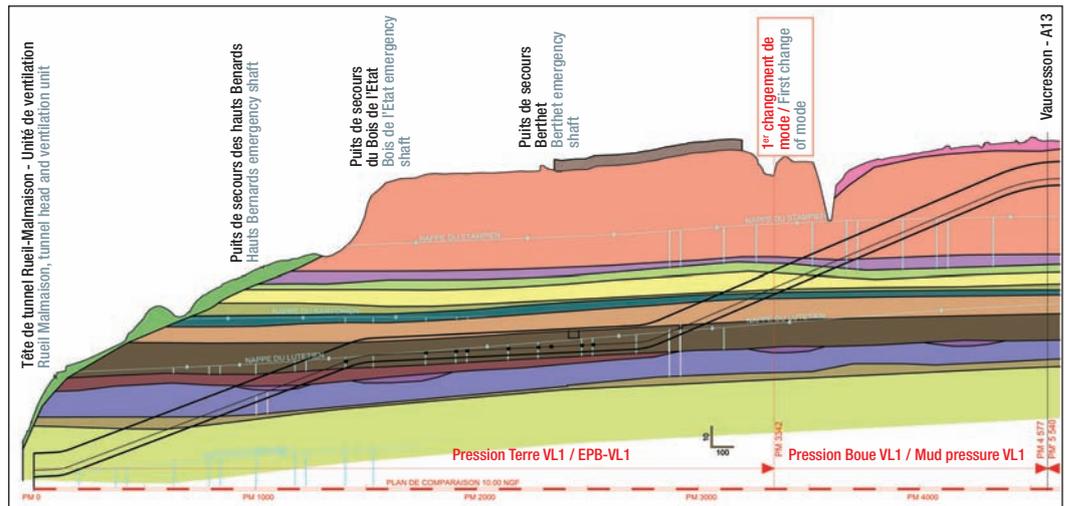


Figure 4 : Coupe géologique au droit du premier tronçon du duplex de l'A86 / Geological cross-section of the first section of the A86 Duplex.

en février 2002 suivie de l'incendie d'un train d'approvisionnement des voussoirs déclaré à 1400 m de l'entrée du tunnel).

Par ailleurs, du retard a été pris en mode terre dans des terrains argileux lié au colmatage de la roue de coupe. La configuration du tunnelier en mode boue effectuée dans des horizons argileux a considérablement pénalisé sa mise en route, en colmatant la roue de coupe, le circuit de marinage et a

given over to 24-hour production, in three eight-hour shifts.

3.1 - First section of the A86 duplex (2000-2003)

Excavation of the first section of the duplex began on November 23, 2000, working from Rueil-Malmaison in EPB mode for a distance of approximately 3350 m. Subsequently, SPB mode was used from

November 2002 onwards for the last 1150 lm, as far as the breakthrough at the A13 interchange at the end of October 2003. The cross-section of the first part runs through horizons ranging from chalk to Fontainebleau sands (figure 4). The average rates of progress of the TBM are shown for each of the geological horizons present at the workface in figure 5.

• Main difficulties

Several exceptional incidents halted EPB excavation of the tunnel for almost five months (train breakdowns in 2001, a workers' and lock operators' strike in February 2002, and a fire on an arch segment supply train which broke out 1400 m from the tunnel entrance).

Delays also occurred in EPB mode in clayey soils due to clogging of the cutting wheel.

Configuring the TBM in SPB mode for clayey horizons significantly slowed startup operations, due to the cutting wheel and the mucking system becoming clogged. It also created problems in separating the fines during bentonite slurry treatment until these had completely disappeared from the workface. Compressed air maintenance was performed to clean the cutting wheel (lasting one and a half

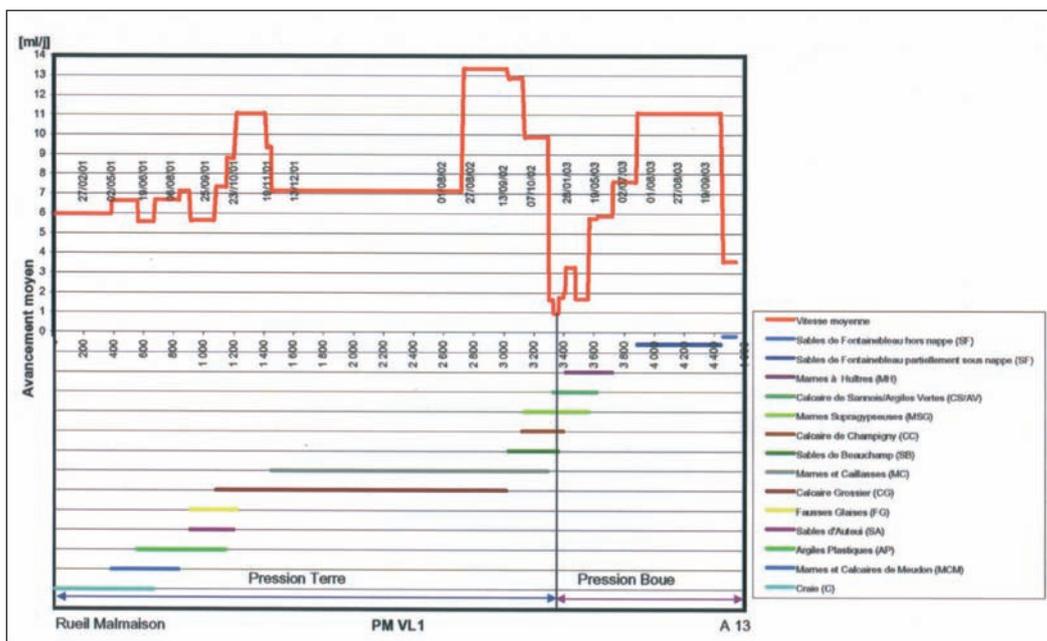


Figure 5 : Avancement moyen (ml/jour) du tunnelier lors du creusement du premier tronçon du duplex de l'A86 en fonction de la géologie traversée / Average rate of progress (lm/day) of the TBM during excavation of the first section of the A86 Duplex for each type of geology encountered.

créé des difficultés de séparation des fines lors du traitement des boues bentonitiques jusqu'à leur disparition du front de taille. Des interventions hyperbares ont dû être réalisées pour nettoyer la roue de coupe (pendant un mois et demi) et pour réparer l'articulation de la jupe suite à la convergence du terrain (pendant deux semaines).

• Cadence en mode terre (2000-2002)

Le tunnelier a travaillé en mode pression de terre pendant 24 mois de novembre 2000 à novembre 2002. Il a franchi des terrains cohérents et stables (figure 4) de la craie aux argiles vertes, excepté les Fausses Glaises et les sables d'Auteuil qui ont été rencontrés localement. L'avancement moyen était de 139 m par mois soit 7,6 m par jour équivalent à celui déjà obtenu en région parisienne mais inférieur aux prévisions. Il a été performant dans les terrains calcaires et marno-calcaires avec une cadence de pointe journalière de 28 m dans le calcaire grossier.

• Cadence en mode boue (2002-2003)

Le tunnelier a creusé en mode pression de boue durant onze mois jusqu'en octobre 2003, il a traversé ainsi le

calcaire de Sannois/argile verte, marnes à huîtres et les sables de Fontainebleau. Sa cadence d'avancement était de 5,2 m par jour en moyenne. Elle était inférieure à celles obtenues en région parisienne et aux prévisions. Cependant, elle a atteint jusqu'à 22 m par jour dans les sables de Fontainebleau.

Huit mois ont été ensuite nécessaires au démontage du tunnelier et à son remontage pour réaliser le percement du second tronçon depuis Vélizy.

3.2 - Second tronçon du duplex de l'A86 (2005-2007)

Le creusement du second tronçon du duplex a démarré depuis Vélizy le 16 juin 2005. Deux changements de mode de confinement ont dû être opérés pour affronter la diversité géologique et relier en 5,5 km l'auto-route A13 le 23 août 2007.

La section du second tronçon est incluse dans les horizons allant des sables de Fontainebleau au calcaire grossier avec présence de fausses glaises et de sables d'Auteuil en radier du tunnel (figure 6). Les cadences d'avancement moyennes en fonction des horizons géologiques rencontrés par le tunnelier sont présentées en figure 7.

months) and to repair the tail seal following soil convergence (lasting two weeks).

• Rate of progress in EPB mode (2000-2002)

The TBM worked in EPB mode for 24 months, from November 2000 to November 2002. It tunneled through consistent, stable soil (figure 4) ranging from chalk to green clay, apart from "fausses glaises" and Auteuil sand, encountered locally. The average rate of progress was 139 lm per month, or 7.6 lm per day, equivalent to prior results elsewhere in the Paris region but below forecast. Better progress was made in limestone and marly limestone soil, with a peak rate of progress of 28 lm in the coarse limestone.

• Rate of progress in SPB mode (2002-2003)

The TBM worked in SPB mode for eleven months, through to October 2003, tunnelling through the Sannois limestone/green clay, oyster marl and Fontainebleau sandstone. The average rate of progress was 5.2 lm per day. This was poorer than the rate achieved elsewhere in the Paris region and below forecasts. However, the TBM did achieve up to 22 lm

per day in the Fontainebleau sands. It then took a further eight months to dismantle the TBM and rebuild it to carry out drilling of the second section from Vélizy.

3.2 - Second section of the A86 duplex (2005-2007)

Excavation of the second section of the duplex commenced from Vélizy on June 16, 2005. Two changes to the mode of confinement had to be carried out to deal with the geological diversity, with the 5.5 km link with the A13 motorway being completed on August 23, 2007.

The cross-section of this part of the route runs through horizons ranging from Fontainebleau sandstone to coarse limestone, with the presence of "fausses glaises" and Auteuil sand at the tunnel foundation level (figure 6). The average rates of progress for the various geological horizons encountered are shown in figure 7.

• Main difficulties

In EPB mode, the TBM had to be halted to change some thirty cutters ruined by siliceous limestone beds within the Champigny limestone (a three-week period from February to mid-March 2006) and to change

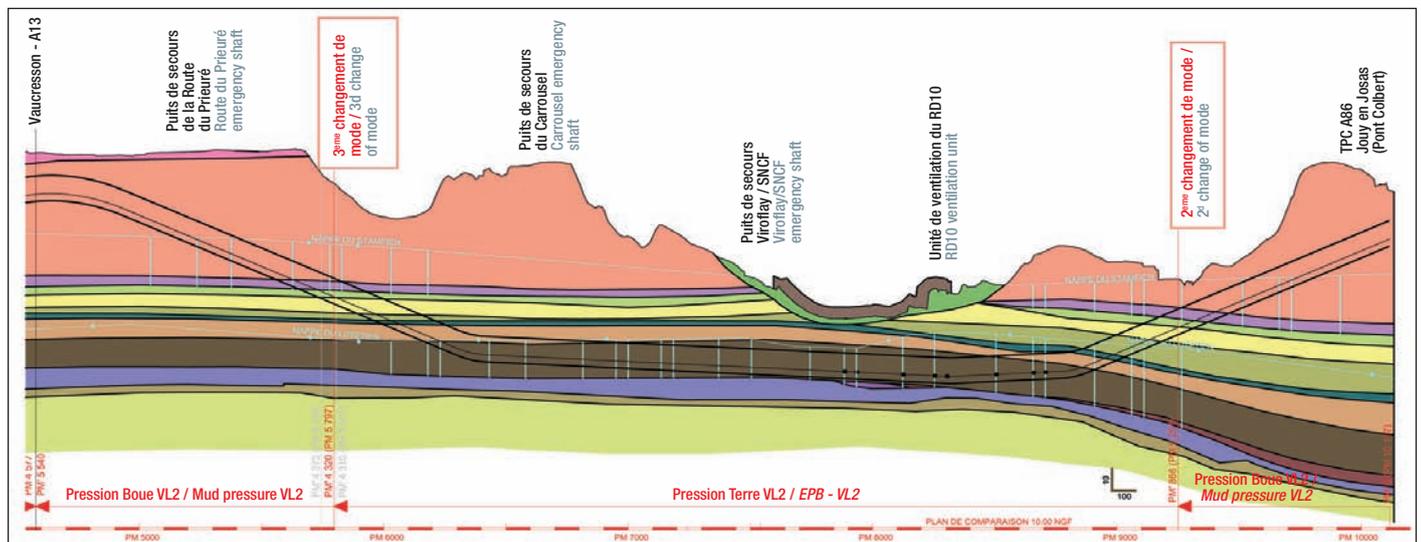


Figure 6 - Coupe géologique au droit du second tronçon du Duplex de l'A86 / Geological cross-section of the second section of the A86 Duplex.

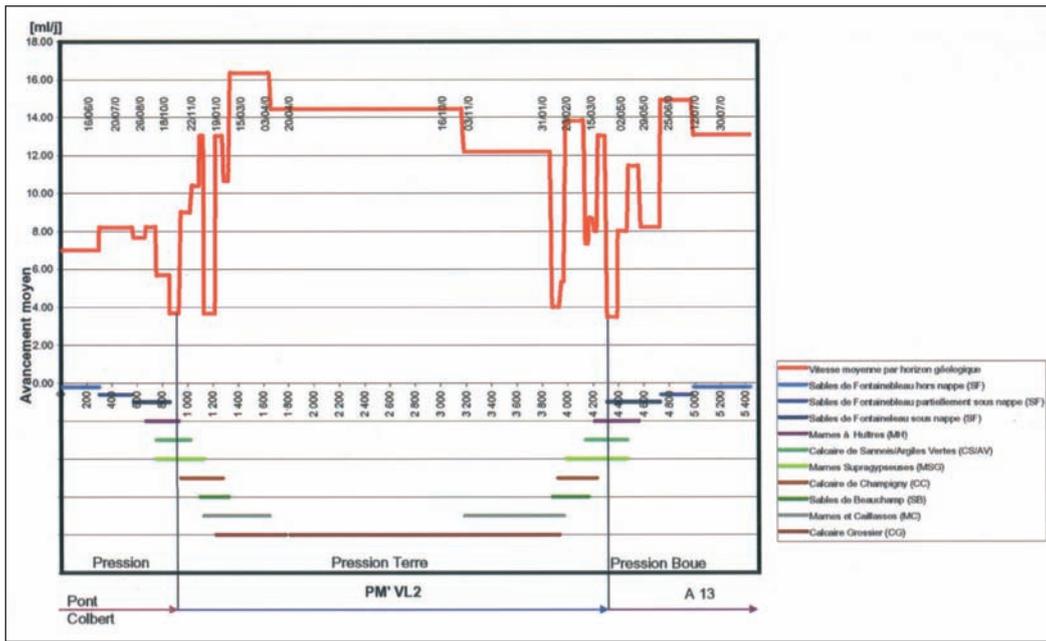


Figure 7 - Avancement moyen (ml/jour) du tunnelier lors du creusement du second tronçon du duplex de l'A86 en fonction de la géologie traversée / Average rate of progress (lm/day) of the TBM during excavation of the second section of the A86 duplex for each type of geology encountered.

• Principales difficultés

En mode terre, le tunnelier a été immobilisé pour changer une trentaine de molettes ruinées par des bancs calcaires silicifiés contenu dans le calcaire de Champigny (durant trois semaines de février à mi-mars 2006) et pour changer des outils de coupe endommagés par une section hétérogène composée de marnes et caillasses (alternance de bancs marneux et bancs calcaires parfois très durs) surmontant le calcaire grossier (constitué de bancs calcaires massifs durs et calcaires sableux tendres).

Le tunnelier a été ralenti dans les deux modes dans les terrains argileux lié au collage des argiles ayant nécessité de fréquents nettoyages de la roue de coupe. En mode boue, des difficultés de séparation au niveau de la centrale de traitement des boues ont été notées dans les terrains argileux et lors de la traversée des parois moulées des niches et des puits.

• Cadence en mode boue (2005 et 2007)

Le tunnelier a travaillé deux fois en

mode boue pour forer le second tronçon du tunnel. Il a parcouru les premiers 866 ml en sept mois du 16 juin au 12 décembre 2005 avec en moyenne 124 ml par mois et 8 ml par jour avec une cadence de pointe de 14 ml par jour dans des sections composées uniquement de sables de Fontainebleau et celles composées de sables de Fontainebleau sous-nappe surmontant les marnes à huîtres. Puis, il a été reconfiguré en mode boue pour percer les 1108 m finaux pendant cinq mois, du 6 avril au 23 août 2007, avec en moyenne une cadence de 222 m par mois et 12 m par jour (avec une pointe de 22 m par jour dans les sables de Fontainebleau).

• Cadence en mode terre

Le tunnelier a foré en mode terre du 23 décembre 2005 au 27 mars 2007 entre les PK 866 et 4320 de l'entrée du second tronçon. Il a atteint une cadence d'avancement de deux anneaux par poste neuf jours ouvrés après la reprise du forage. L'avancement moyen était de 12,8 m par jour.

Le tunnelier a été performant dans les

cutting tools damaged by a heterogeneous section consisting of marl and loam with alternating beds of marl and limestone, sometimes very hard), above the coarse limestone (consisting of beds of hard limestone formations and soft sandy limestone).

Progress of the TBM was slowed in both modes in the clayey soils due to the stickiness of the clay, which required frequent cleaning of the cutting wheel. In SPB mode, difficulties in separation in the slurry treatment unit were noted in clayey soils and when crossing the slurry walls of shelters and shafts.

• Rate of progress in SPB mode (2005 and 2007)

The TBM was operated twice in SPB mode during drilling work for the second tunnel section. The first 866 lm took seven months, from June 16 to December 12, 2005, at an average rate of 124 lm per month and 8 lm per day, with a peak rate of progress of 14 lm per day in sections consisting solely of Fontainebleau

sandstone and the Fontainebleau sandstone aquifer above the oyster marl. It was then reconfigured in SPB mode prior to drilling the 1108 lm for the five months from April 6 to August 23, 2007, with an average rate of progress of 222 lm per month and 12 lm per day, with a peak rate of progress of 22 lm per day in the Fontainebleau sandstone.

• Rate of progress in EPB mode

The TBM was in EPB mode from December 23, 2005 to March 27, 2007, for the section between 866 and 4320 m from the start of the second section. It reached a rate of progress of two rings per shift, nine working days after recommencement of drilling. The average rate of progress was 12.8 lm per day. The TBM performed well in soft, consistent limestone and marly limestone soil, progressing by between 12 and 16 lm per day and up to 32 lm per day in coarse limestone. Progress was slower in clayey soils, with an average daily progress of 4 lm, due to clay clogging requiring frequent cleaning of the cutting wheel.

3.3 - Summary (table 4)

The rates of progress of the TBM during excavation of the duplex for each type of configuration (SPB and EPB modes) are shown in Table 4. The TBM drilled over 10 lm per day in homogenous sections consisting of just one geological horizon. In mixed sections, the TBM worked slower, achieving scarcely 2 lm per day in sections consisting of clayey horizons.

4 - Detailed analysis of changes in mode

Changing modes was an extremely delicate operation. TBM and slurry unit teams needed a learning period

Changement de mode / Mode changeover	Tunnel	PM	PM'	Hauteur de couverture en calotte (m) / Height of overburden above roof (m)	Nature des terrains en couverture/ épaisseurs (m) / Overburden soil type/thickness (m)	Nature des terrains au front/épaisseurs (m) / Soil type at workface/thickness (m)	Charge d'eau en calotte (m) / Hydraulic load above roof (m)	Avancement moyen sur 100 m après le changement de mode / Average rate of progress over 100 m following mode changeover
Terre/Boue / EPB/SPB	VL1	3 342		45	SF : 39,0	CS/AV : 1,5	22	2,0 m/j
					MH : 3,0	MSG : 8,0		
					CS/AV : 3,0	CCh : 1,5		
						SB : 0,5		
Boue/Terre / SPB/EPB	VL2		866	13	SF : 12,0	MH : 4,0	12	8,6 m/j
					MH : 1,0	CS/AV : 3,5		
						MSG : 4,0		
Terre/Boue / EPB/SPB	VL2	4 320		32	SF : 32,0	SF : 1,4	15	5,2 m/j
						MH : 4,0		
						CS/AV : 3,2		
						MSG : 3,0		

VL1 : premier tronçon du duplex de l'A86 / *first section of the A86 Duplex*
 VL2 : second tronçon du duplex de l'A86 / *second section of the A86 Duplex*
 SF : Sables de Fontainebleau / *Fontainebleau Sandstone*
 MH : Marnes à Huîtres / *Oyster Marl*

CS/AV : Calcaire de Sannois/Argiles Vertes / *Sannois Limestone/Green Clay*
 MSG : Marnes Supragypseuses / *Supra-Gypsum Marl*
 PM : points métriques ayant pour origine Rueil-Malmaison / *metre posts, point of origin: Rueil-Malmaison*
 PM' : points métriques ayant pour origine Jouy-en-Josas / *metre posts, point of origin: Jouy-en-Josas*

Tableau 4 - Synthèse des changements de mode / *Summary of mode changeovers.*

terrains tendres et cohérents de type calcaire et marno-calcaire : 12 à 16 m par jour en moyenne pouvant atteindre jusqu'à 32 m par jour dans le calcaire grossier. Il a été ralenti dans les terrains argileux atteignant en moyenne 4 m par jour lié au collage des argiles ayant nécessité de fréquents nettoyages de la roue de coupe.

3.3 - Synthèse (tableau 4)

Les cadences d'avancement du tunnelier lors du creusement du duplex sont présentées dans le tableau 4 en fonction de sa configuration utilisée (mode boue ou mode terre). Le tunnelier a foré à raison de plus de 10 m par jour dans des sections homogènes composées d'un seul horizon géologique. Dans des sections mixtes, le tunnelier a été ralenti et a atteint à peine 2 m par jour dans des sections

constituées d'horizons argileux.

4 - Analyse détaillée des changements de mode

Le changement de mode est une opération extrêmement délicate et le mode boue nécessite quelques temps d'apprentissage pour les équipes du tunnelier et de la centrale à boue. Le front de taille doit être imprégné de « cake bentonitique » pour éviter les pertes d'air ou les arrivées d'eau. La vis de marinage doit être retirée et le concasseur doit être installé dans la chambre à bulle et l'usure des outils de la roue de coupe (dents et molettes) doit être contrôlée avant de reprendre le creusement en mode boue. Parallèlement, le démontage du convoyeur doit débiter par l'enroulement de la bande de tapis de marinage.

at the start of SPB mode operation. The workface had to be impregnated with bentonite "slurry cake" to avoid any loss of air or water ingress. The screw conveyor had to be withdrawn, the crusher installed in the compressed-air chamber, and wear of the cutting wheel tools (teeth and cutters) inspected before resuming excavations in SPB mode. At the same time, work had to start on dismantling the conveyor, by rolling up the mucking conveyor belt.

4.1 - First changeover (EPB to SPB)

The TBM was halted 3342 m from the entrance to the first section for five days, from November 19-25 2002, in the supra-gypsum marl beneath the green clay (figure 8) so that the SPB mode could be properly

"controlled" prior to passing adjacent to the SNCF tracks located 250 m further on. Changeover from EPB mode to SPB mode in the first section, in clayey soil, disrupted progress of the TBM due to the clay sticking to the cutting wheel and in the mucking system and creating problems in separating the fines in the slurry treatment unit. Progress of the TBM was hindered for over five months, until the supra-gypsum marl section had been bored through.

4.2 - Second mode changeover: SPB to EPB

During compressed air maintenance some sixty metres prior to the second changeover (SPB to EPB), subsidence occurred on Saturday November 25, 2005, 818 m from the entrance to the second section. This extended for a

4.1 - Premier changement de mode : de terre à boue.

Le tunnelier a été immobilisé à 3342 m de l'entrée du premier tronçon pendant cinq jours du 19 au 25 novembre 2002 dans les marnes supragypseuses surmontées par les argiles vertes (figure 8) pour que, lors de son passage au droit des voies SNCF situées 250 m plus loin, le mode boue soit maîtrisé. Le passage du mode terre au mode boue sur le premier tronçon en terrains argileux a perturbé l'avancement du tunnelier, à cause du collage des argiles sur la roue de coupe et dans le circuit de marinage, entraînant des difficultés de séparation des fines au niveau de l'usine de traitement des boues. L'avancement du tunnelier a été perturbé pendant plus de cinq mois jusqu'à la disparition de la section des marnes supragypseuses.

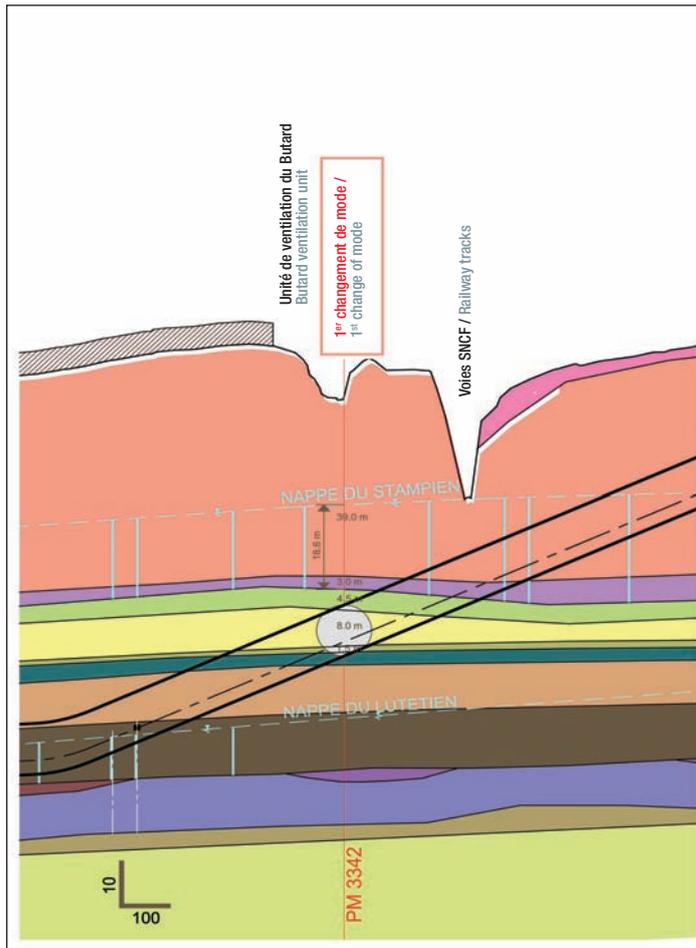
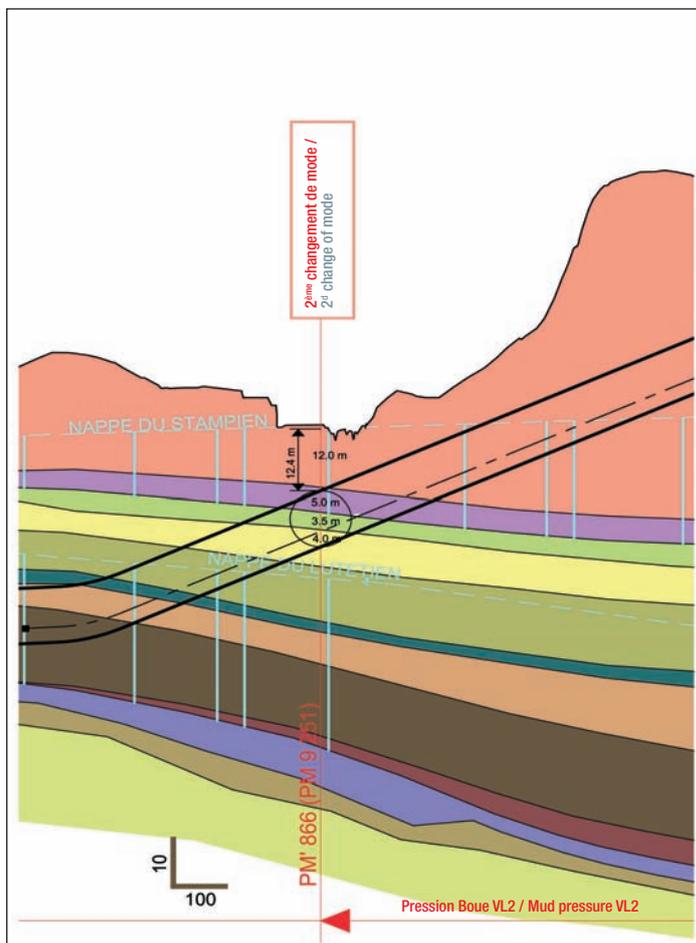


Figure 8 - Contexte géologique du premier changement de mode du tunnelier / Geological context of the first TBM mode changeover.

4.2 - Deuxième changement de mode : de boue à terre

Lors de l'intervention hyperbare une soixantaine de mètres avant de réaliser le deuxième changement (de boue à terre), un fontis a été créé le samedi 25 novembre 2005, à 818 m de l'entrée du second tronçon sur environ 10 m et 3 m de profondeur. Une fois le fontis stabilisé, le creusement en mode boue a repris le lundi 27 novembre 2005 jusqu'à la disparition des sables de Fontainebleau au niveau du front de taille.

Le tunnelier a été ensuite immobilisé comme prévu au PM 866 (figure 9) pour réaliser les opérations hyperbares du 13 au 22 décembre 2005 et le configurer en mode terre. Le front de taille était situé entièrement dans des terrains argileux composés de la voûte à la base de marnes à huîtres, de calcaire de Sannois / argile verte et de marnes supragypseuses. La base des sables de Fontainebleau était à 1 m au dessus de la voûte.



distance of some 10 m and was some 3 m deep. Once it had been stabilised, SPB mode excavation resumed on Monday November 27, 2005 until no more Fontainebleau sandstone was in evidence at the workplace.

The TBM was then halted as planned at metre post 866 (figure 9) to carry out compressed air maintenance, from December 13-22, 2005, to configure it in EPB mode. The workface was located fully in clayey soils, consisting, working from top to bottom, of oyster marl, Sannois limestone/green clay and supra-gypsum marl. The bottom of the Fontainebleau sandstone was 1 m above the top of the arch.

The TBM resumed work in EPB mode on December 23, 2005, reaching a rate of progress of two rings per shift nine working days after drilling work recommenced.

4.3 - Third mode changeover (EPB to SPB)

To carry out the third changeover, from EPB to SPB mode, the TBM operated in semi-closed EPB confinement mode with compressed air as far as the contact point with Fontainebleau sandstone at the top of the tunnel cross-section, to keep

Figure 9 : Contexte géologique du deuxième changement de mode du tunnelier / Geological context of the second TBM mode changeover.

Le tunnelier a redémarré en mode terre le 23 décembre 2005 et a atteint une cadence d'avancement de deux anneaux par poste, neuf jours ouvrés après la reprise du forage.

4.3 - Troisième changement de mode : de terre à boue

Pour opérer le troisième changement de mode (terre à boue), le tunnelier a fonctionné en mode de confinement terre semi-fermé avec air comprimé, jusqu'à la zone de contact avec les sables de Fontainebleau en voûte de la section du tunnel (pour minimiser le collage des marnes supragypseuses sur le disque de coupe et dans le circuit de marinage lors du redémarrage en mode boue). L'épaisseur des sables de Fontainebleau devait être inférieure à la taille d'un homme pour que les hyperbaristes puissent « gendarmier » le front de taille en cas de décompression. De plus, la pression de confinement devait être la plus faible, tout en restant dans des conditions de sécurité satisfaisantes pour qu'il y ait le moins d'opérations hyperbares à effectuer.

Le 27 mars 2007 une anomalie a été constatée entre les résultats de pesée des matériaux extraits et celui du volume théorique correspondant. L'auscultation des terrains en surface au droit du tunnelier a montré la formation de deux fontis de 30 et 200 m³ au niveau de la parcelle 77 de la forêt domaniale de Fausses Reposes. La configuration en mode boue s'est déroulé conformément aux procédures et au programme en mode hyperbare du 28 mars au 5 avril 2007 (figure 10). La mise en boue du réseau de marinage a été réalisée le 30 mars 2007. En surface des travaux de balisage et de remblayage des fontis ont eu lieu de 5 et 6 avril 2007. Des injections complémentaires de mortier de bourrage ont été réalisées depuis le tunnel pour conforter le terrain décomprimé. Le démarrage en mode boue s'est déroulé après remplissage complet de

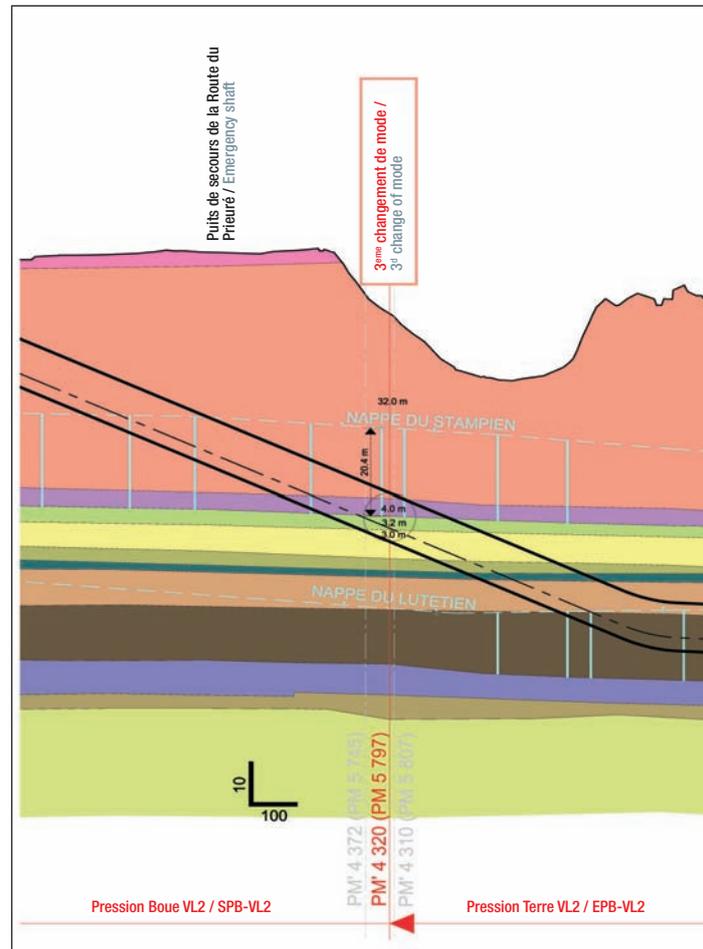


Figure 10 - Geological context of the third TBM mode changeover / Contexte géologique du troisième changement de mode du tunnelier.

la chambre d'abattage de boue bento-nitique le 6 avril 2007. Une rupture de conduite de marinage s'est produite suite à une surpression lors du creusement deux anneaux plus loin. Les réparations ont été entreprises les jours suivants. Le tunnelier a atteint, 14 jours ouvrés après le changement de mode, une cadence de creusement de deux anneaux par poste.

4.4 - Bilan

Trois changements de mode ont été nécessaires au creusement du duplex de l'A86. L'avancement moyen sur 100 m après avoir effectué chaque changement de mode est donné ainsi que son contexte géologique dans le tableau 4.

A chaque changement de mode effectué dans les sables de Fontainebleau, une décompression a été observée en voûte du tunnel soit sous forme

and 200 m³ in plot 77 of the Fausses Reposes national forest. SPB mode configuration was completed as per normal and in line with the compressed air programme running from March 28 to April 5, 2007 (figure 10). The mucking system was filled on March 30, 2007. Surface marking out and filling in of the subsidence took place on April 5 and 6, 2007. Additional grouting injections were carried out from within the tunnel to reinforce the decompressed soil. Startup in SPB mode took place once the cutting chamber had been completely filled with bentonite slurry, on April 6, 2007. Two rings further on, a mucking pipe split following overpressure during excavations. Repairs were undertaken over the following days. 14 working days after the mode changeover, the TBM achieved a rate of progress of two rings per shift.

4.4 - Evaluation

Three mode changeovers were required to excavate the A86 duplex tunnel. The average rate of progress for a distance of 100 m following each mode changeover is shown, along with the geological context, in table 4.

During each mode changeover that took place in Fontainebleau sandstone, decompression was observed at the top of the tunnel, either in the form of subsidence or notching. Confinement mode changeover for the TBM should take place in a section in which the risk of subsidence is at a minimum. For a changeover from EPB to SPB mode to be successful, as was the case in the last mode changeover, there must be no more than 10% of Fontainebleau sandstone (with a clayey base and low permeability) in the cross-section, with a thickness equivalent to the height of a man. This makes it possible to intervene in the event of

the sticking issues with supragypsum marl on the cutting wheel and in the mucking system to a minimum on resumption of work in SPB mode. The thickness of the Fontainebleau sandstone had to be smaller than the height of a man for the compressed air workers to be able to shore up the workface in the event of signs of decompression. Furthermore, confinement pressure had to be as low as possible whilst observing satisfactory safety conditions, in order to keep the number of compressed air operations required to a minimum.

On March 27, 2007, a major discrepancy was observed between the weights recorded for extracted materials and the corresponding theoretical quantities. Observation of surface soil above the TBM revealed the formation of two areas of subsidence with respective volumes of 30

de fontis soit sous forme de cloche. Le choix de la section où le tunnelier permute son mode de confinement doit se porter sur une zone où le préjudice de fontis, s'il y a lieu soit amoindri. Pour un changement de mode terre à boue réussi comme celui opéré lors du dernier changement de mode, il faut qu'il ait 10 % de sables de Fontainebleau (argileux à leur base et peu perméables) dans la section équivalent en épaisseur à la taille d'un homme. Cela permet d'intervenir lors de décompressions éventuelles en soutenant en calotte le terrain par la mise en place d'un gendarmage. Et cela réduit consi-

Avancement du tunnelier mixte (m/j) / Progress of dual-mode TBM (m/day)	Mode boue / SPB mode			Mode terre / EPB mode	
	VL1	VL2		VL1	VL2
	PM	PM'		PM	PM'
	3 342 au 4 540	0 au 866	4 320 au 5 428	0 au 3 342	866 à 4 320
Moyen / Average	5	8	12	8	13
Maximal / Maximum	22	14	22	28	32

PM : points métriques utilisés pour le premier tronçon ayant pour origine Reuil-Malmaison croissant en direction de l'A13 / metre posts for first section, point of origin: Reuil-Malmaison, increasing towards the A13 motorway.

PM' : points métriques utilisés pour le second tronçon ayant pour origine Jouy-en-Josas croissant en direction de l'A13 / metre posts for second section, point of origin: Jouy-en-Josas, increasing towards the A13 motorway.

Tableau 5 - Bilan de l'avancement du tunnelier lors du creusement du duplex de l'A86 / Summary of TBM progress during excavation of the A86 Duplex.

dérablement les problèmes de collage de la roue de coupe, du circuit de marirage et les difficultés de gestion de traitement des boues, ce qui permet d'accroître l'avancement du tunnelier.

any decompression, supporting the top section of soil with appropriate shoring structures. This significantly reduces issues of clogging for the cutting wheel and mucking system

and problems relating to slurry processing, which in turn enables the TBM to achieve a better rate of progress.

5 - Conclusion

Le creusement du duplex de l'A86 a démarré en 2000 et s'est terminé en 2007 ; il a duré, en tenant en compte de l'arrêt de chantier entre les deux tronçons, un peu plus de cinq ans, avec un avancement moyen de 7 m par jour sur le premier tronçon et de 11 m par jour sur le second tronçon. L'expérience acquise tout au long du chantier a été bénéfique aux deux modes de confinement pression de terre et pression de boue (tableau 5). Les modifications entreprises au niveau du tunnelier et de l'usine de traitement des boues bentonitiques ont permis d'accélérer les cadences d'avancement du tunnelier lors du creusement du second tronçon en mode boue en passant de 5m par jour sur le premier tronçon à 8 et 12 m par jour sur le second tronçon.

La vitesse instantanée théorique en phase creusement du tunnelier de l'A86 (puissance 4000 kW, diamètre 11,56m) était de 4,8 m/h. L'avancement global d'un tunnelier intègre :

- La phase creusement
- La phase pose des voussoirs
- Les phases de rallongement des servitudes
- Les phases de maintenance préventives et curatives
- Les pannes et contraintes de la logistique
- Les phases spécifiques : démarrage, repli du bâti de poussée, changement de mode, sortie, etc.

Les meilleurs rendements ont bien été obtenus dans des sections à géologie homogène : 22 m par jour dans les sables de Fontainebleau en mode pression de boue et 32 m par jour dans le calcaire grossier en mode pression de terre.

Le retour d'expérience du creusement du duplex de l'A86 au tunnelier mixte permet de montrer qu'il est possible de creuser les tunnels de grand diamètre du « Grand Paris » en progressant en moyenne de 10 m par jour en mode pression de boue et de 12 m par jour en mode pression de terre. Le creusement au tunnelier mixte reste un défi technique et économique difficile à relever mais qui pourrait être envisagé pour des projets de diamètre supérieur de tunnels du « Grand Paris ».

5 - Conclusion

Excavation of the A86 duplex tunnel commenced in 2000 and was completed in 2007. Not counting the halt in works between the two sections, it took a little over five years. The average rate of progress was 7 lm per day for the first section and 11 lm per day for the second section. The worksite enabled useful experience to be acquired for both forms of confinement: earth pressure balance and slurry pressure balance (table 5).

Changes to the TBM and the bentonite slurry treatment unit made it possible to accelerate the rate of progress of the TBM during excavation of the second section in SPB mode, up from 5 lm per day in the first section to between 8 and 12 lm per day in the second section.

The theoretical instantaneous excavation speed of the A86' TBM (4000 kW - 11.56 m-diameter) was 4.8 m/h. The overall average progress of a TBM takes into account:

- The excavation phase
- The segments laying phase
- The services extension phases
- The preventive and remedial maintenance phases
- The logistics breakdowns and constraints
- The specific phases: start, withdrawal of the thrust frame, change of mode, removal, etc.

The best performances were achieved for excavations with homogenous geology: 22 m per day in the Fontainebleau sandstone in SPB mode and 32 m per day in coarse limestone in EPB mode.

The return on experience acquired during excavation of the A86 duplex tunnel with a dual mode TBM shows that it is possible to drill the large-diameter tunnels for the "Grand Paris" project with an average rate of progress of 10 m per day in SPB mode and 12 m per day in EPB mode. Excavation by means of a dual mode TBM remains a difficult challenge in both technical and economic terms, but could be envisaged for large-diameter tunnel projects of the type envisaged for Grand Paris.