



Eole : symphonie technique en sous-sol

●●● CINQUIÈME DES LIGNES DE RER, LA TOUTE NOUVELLE LIGNE E MATÉRIALISE UN VÉRITABLE PRODIGE : RÉALISER EN PLEIN CENTRE DE PARIS UN TUNNEL DE 3 KM ET DEUX GARES ENTERRÉES AUX DIMENSIONS ÉQUIVALENTES À TROIS FOIS LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME, C'EST D'ABORD UNE GAGEURE ; QUANT À ORCHESTRER LA MULTIPLICITÉ DES INTERVENANTS ET LA PLURALITÉ DES TECHNIQUES EN RÉUSSISSANT LE MARIAGE DU GÉNIE CIVIL ET DE L'ARCHITECTURE, C'EST MÊME UN AUTRE STADE... CELUI DE L'AVENTURE HUMAINE.



Eole est mort le 14 juillet 1999. Il a symboliquement disparu lors de son ouverture au public, laissant la place à la ligne E du RER. Dernière des grandes artères parisiennes de transport ferroviaire, la ligne nouvelle relie pour le moment Villiers-sur-Marne et Chelles à la gare Saint-Lazare en passant par la station Magenta, construite entre la gare de l'Est et la gare du Nord. Destinée à désengorger la ligne A du RER, la liaison a vocation à être prolongée vers l'est jusqu'à Touran-en-Brie et vers l'ouest depuis Pont-Cardinet, sans qu'aucune date, toutefois, n'ait été arrêtée pour ce dernier prolongement. Dans sa configuration actuelle, la nouvelle ligne procure un gain de temps d'une demi-heure entre ses gares terminus et Paris-Saint-Lazare. Mais plus qu'une simple liaison, elle est un nœud de correspondance cardinal pour les usagers des transports parisiens.

Depuis les gares Haussmann-Saint-Lazare et Magenta, le voyageur se voit proposer 10 correspondances de RER (RER A, RER B, RER D) ou de métro (lignes 3, 4, 5, 9, 12, 13 et 14, autrement dénommée Météor) ainsi qu'un accès souterrain aux grandes lignes banlieue de la gare de l'Est et de la gare du Nord.

Mais plus qu'un simple lieu de passage, les deux gares souterraines forment un espace porteur d'une véritable identité qui concrétise le mariage entre génie civil et architecture. Enfin, ces deux gigantesques volumes enterrés, au même titre que le tunnel, représentent un véritable défi technique. Un défi d'autant plus difficile à relever que leur réalisation a dû composer avec un contexte géologique assez tourmenté.

● Le terrain : un sous-sol particulièrement diversifié

Entre les gares Haussmann-Saint-Lazare et Magenta, les gares, le tunnel et les puits de ventilation s'inscrivent dans des terrains d'une grande diversité. Depuis la surface jusqu'aux points les plus profonds, se succèdent des couches irrégulières de remblais et des éboulis argilo-marneux, des marnes infragypseuses de 6 à 10 m, des sables de Monceaux ou sables verts, des marnocalcaires de Saint-Ouen sur 12 à 18 m, des sables de Beauchamp avec présence d'argile, des marnes et caillasses avec calcaire grossier sur 10 à 16 m, des calcaires grossiers durs ou tendres sur 12 à 18 m ou encore des sables supérieurs et de la fausse

glaise avec une présence de lignite. Au total ce sont près de 200 forages qui ont été pratiqués avant le lancement des travaux afin d'avoir une connaissance aussi complète que possible des terrains rencontrés. Mais cette campagne de sondages n'a pas empêché quelques surprises, voire des arrêts de chantier. Pourtant, ce tracé en profondeur à – 30 m du niveau du sol avait été choisi notamment pour réduire l'impact du chantier en surface, et la technique du creusement mécanisé par un tunnelier à pression de boue pour sa capacité à réduire les tassements de surface. Quant à l'excavation au tunnelier, elle s'imposait aussi par un coût au mètre linéaire près de deux fois inférieur à celui des techniques classiques pour une galerie de 2 km, tout en autorisant des cadences 5 à 10 fois supérieures. À titre d'exemple, le creusement des

1 700 m de la première galerie – qui pour sa part n'a rencontré aucun écueil majeur – a pu être réalisé en 386 jours de travail. Au terme de l'opération, et donc après la pose de 1 245 anneaux, soit quelques 7 500 voussoirs en béton préfabriqué, le tunnelier a été démonté et réacheminé jusqu'à son point de départ pour commencer la seconde galerie. Mais la géologie et l'hydrogéologie du site ont largement conditionné le choix des dispositions techniques adoptées pour les deux gares.

● Une excavation d'envergure menée progressivement

La réalisation des gares s'est déroulée pas à pas, afin d'éviter une décompression trop brutale des terres. Précisons à ce sujet que le volume des matériaux extraits s'élève à environ 1,3 million de

- **1** La ligne E du RER offre un accès rapide au cœur de Paris à partir de l'Est de l'Ile de France. Elle déleste en cela la ligne A.
- 2** La légèreté des escaliers et des équipements contraste volontairement avec la massivité des structures. **3** Les volumes monumentaux de ses gares souterraines favorisent un écoulement fluide des flux d'usagers. **4** Les voûtes empruntent à l'écriture romane, un style auquel les architectes se réfèrent explicitement.



3



4

mètres cubes, et ce, pour construire près de 150 000 m³ avec une emprise accordée par la ville de Paris limitée 2 000 m². Pour limiter les perturbations "en surface", les deux tiers des matériaux ont été évacués par voie souterraine, au moyen notamment d'une bande transporteuse capable d'emporter 1 500 m³ par jour. Pas question, donc, d'envisager de tels mouvements de terre sans un confortement parallèle des terrains.

● Le jet grouting à l'honneur

En premier lieu, les deux gares ont largement recouru au *jet grouting*. La technique consiste à injecter le terrain au moyen d'un mélange d'eau et de ciment à haute pression afin de créer des colonnes de béton. Dans le cas de la gare de Haussmann-Saint-Lazare, c'est un total de 1 600 m de colonnes (1,20 m de diamètre et 6 m de profondeur moyenne) qui ont été réalisés de la sorte. L'objectif était double : améliorer la cohésion des sols, en supprimant les travaux d'injection classiques, et ceinturer la zone par un rideau étanche. Le radier de la gare se situe en effet en dessous de la nappe phréatique (voir encadré p.31). À Magenta, près de

3 000 colonnes ont été coulées par la méthode du jet double, créant ainsi un véritable bouclier pour permettre aux machines à attaque ponctuelle d'intervenir en toute sécurité.

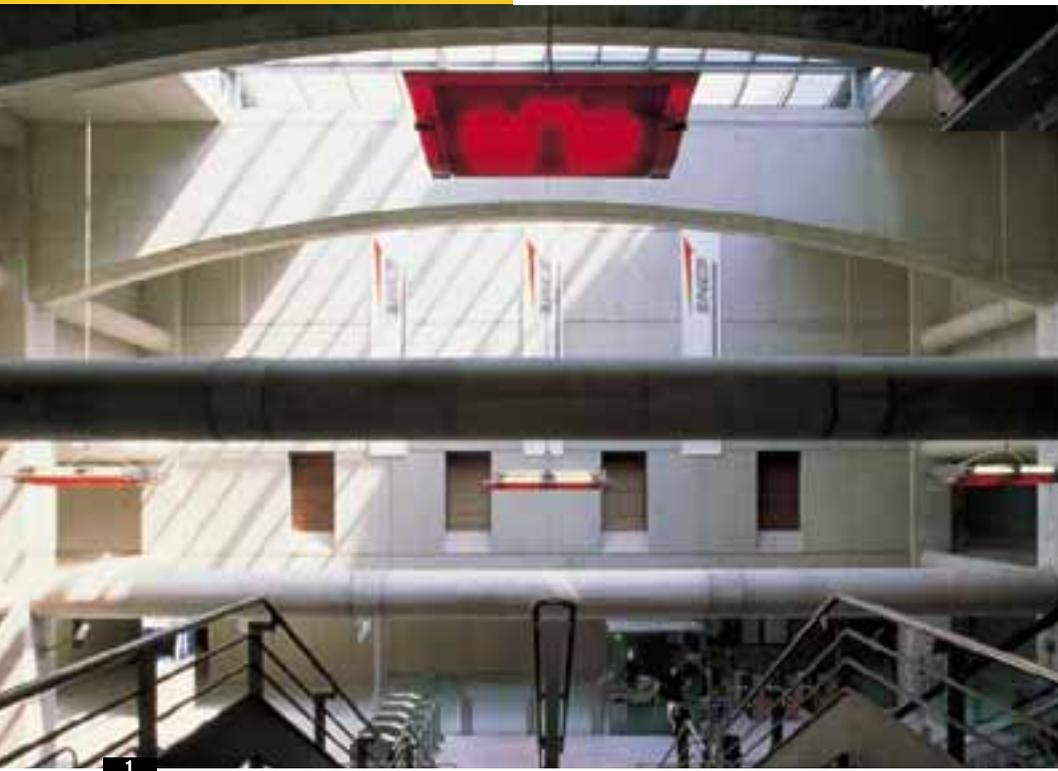
À l'instar de la plupart des puits destinés à être conservés, les gares ont toutes deux utilisé la technique de la paroi moulée. Des voiles de béton coulés dans le sol, en particulier, ont servi à créer une enceinte résistante pour les 2 400 m² à ciel ouvert du hall Caumartin, au-dessus de la station Haussmann-Saint-Lazare. Les deux ouvrages sont entièrement enfermés dans une enveloppe étanche. Sur un béton de propreté de 10 cm d'épaisseur, trois couches sont successivement mises en place : un feutre antipoinçonnement qui protège l'extrados, une membrane PVC 20/10 qui assure l'étanchéité proprement dite et une autre (17/10) qui protège l'intrados. L'ensemble du complexe est recouvert d'une chape de protection de 3 cm d'épaisseur, coulée avant le bétonnage du radier.

Pourtant, bien qu'elles partagent certaines techniques, les deux gares présentent aussi de notables différences dans les méthodes de construction et le "phasage" des opérations qui ont jalonné leur réalisation. ■

REPÈRES

La ligne E du RER en chiffres

- 8 gares desservies de Chelles-Gournay à Haussmann-Saint-Lazare par la branche nord du RER E.
- 9 gares desservies de Villiers-sur-Marne à Haussmann-Saint-Lazare par la branche sud.
- 3 minutes pour rallier les gares de Magenta et de Condorcet.
- 15 minutes gagnées grâce à la réalisation du tronçon central.
- 30 minutes gagnées sur un trajet banlieue est – Paris-Saint-Lazare.
- 2 nouvelles gares souterraines.
- 5 correspondances par métro ou par RER dans chacune des gares souterraines.
- 53 rames duplex accueillant 1 100 passagers assis.
- Capacité de la ligne E du RER : 30 trains/heure dans chaque sens (12 trains/heure dans chaque sens à l'inauguration).
- Coût final du projet : 12 milliards de francs (2/3 pour les travaux, 1/3 pour les rames).



Gare Magenta : progression pas à pas

Longue de 228 m, large de 50 m et haute de 15 m, la gare Magenta est construite dans les couches géologiques comprises entre les marnes et les sables de Beauchamp. Un sous-sol qui autorise des excavations plus limitées qu'à Haussmann-Saint-Lazare. Ainsi, la progression des travaux de génie civil du tunnel central et des deux galeries latérales s'est faite essentiellement de haut en bas, suivant un "phasage" plus complexe, comportant huit temps.

● Huit étapes dans le détail

→ **Premier acte.** – Les entreprises excavent des portions supérieures des galeries longitudinales Est et Ouest, ainsi que la demi-section supérieure de la galerie centrale Ouest.

→ **Deuxième acte.** – Après creusement et renforcement de la demi-section supérieure de la galerie centrale Est (confor-

tée par un boulonnage et un béton projeté additionné de fibres métalliques), des tubes d'acier sont foncés dans les sols afin de créer une voûte protectrice permettant l'ouverture du tunnel central.

→ **Troisième acte.** – Abaissement des galeries centrales et déplacement des travaux de *jet grouting* des galeries ouest à la galerie centrale Est.

→ **Quatrième acte.** – Achèvement de l'excavation de la galerie centrale Ouest et bétonnage de la culée creuse Est.

→ **Cinquième acte.** – Achèvement de l'excavation de la galerie latérale Ouest, avec bétonnage et boulonnage de sa voûte et coulage d'une moitié de son radier.

→ **Sixième acte.** – Application des mêmes travaux à la galerie latérale Est avec, toutefois, un bétonnage intégral de la culée pleine.

→ **Septième acte.** – Excavation et réalisation de la voûte du tunnel central selon la technique de la voûte active.

→ **Huitième acte.** – Progression vers le

HISTORIQUE

Les dates-clés

- **13 octobre 1988 :** Michel Rocard, Premier ministre, annonce la réalisation d'Eole.
- **15 novembre 1991 :** déclaration d'utilité publique de la liaison.
- **14 février 1994 :** baptême du tunnelier Martine.
- **4 mai 1995 :** achèvement du premier tunnel.
- **Fin novembre 1996 :** achèvement du second tunnel.
- **Mi-janvier 1999 :** mise sous tension des installations de traction électrique.
- **14 juillet 1999 :** mise en service commercial de la branche nord, jusqu'à Chelles-Gournay.
- **30 août 1999 :** mise en service de la branche sud, jusqu'à Villiers-sur-Marne.

bas des creusements, suivie d'un bétonnage du radier central.

La voûte de la gare se situe parfois à seulement 8 m des fondations des immeubles, ce qui a entraîné de nombreuses reprises en sous-œuvre en cours d'exécution, comme à Haussmann-Saint-Lazare d'ailleurs. Une des différences majeures par rapport à cette der-

nière tient à la réalisation d'une voûte active. Cette technique consiste, après projection d'une couche de béton, à mettre en place un anneau définitif constitué de voussoirs préfabriqués. Elle autorise un gain de temps appréciable sur les travaux de confortement et de ferrailage, tout en offrant l'assurance d'une qualité constante des bétons. ■



3

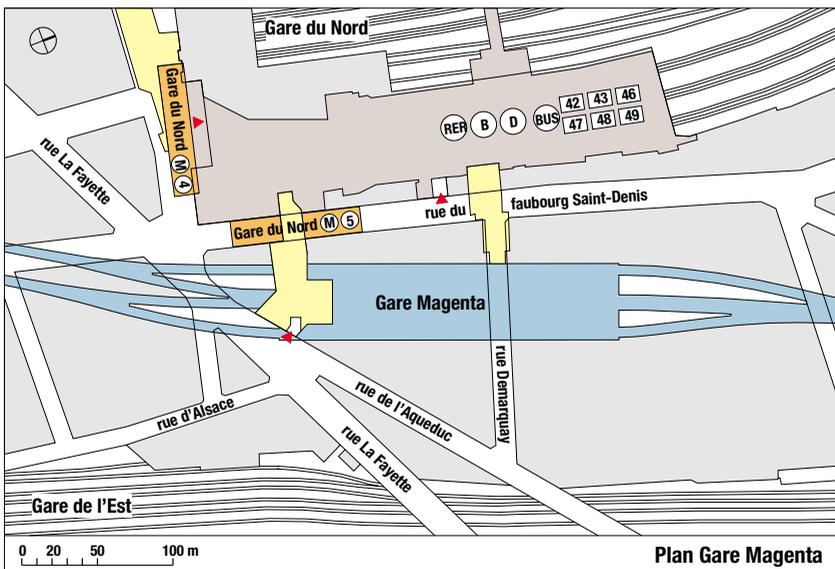


4

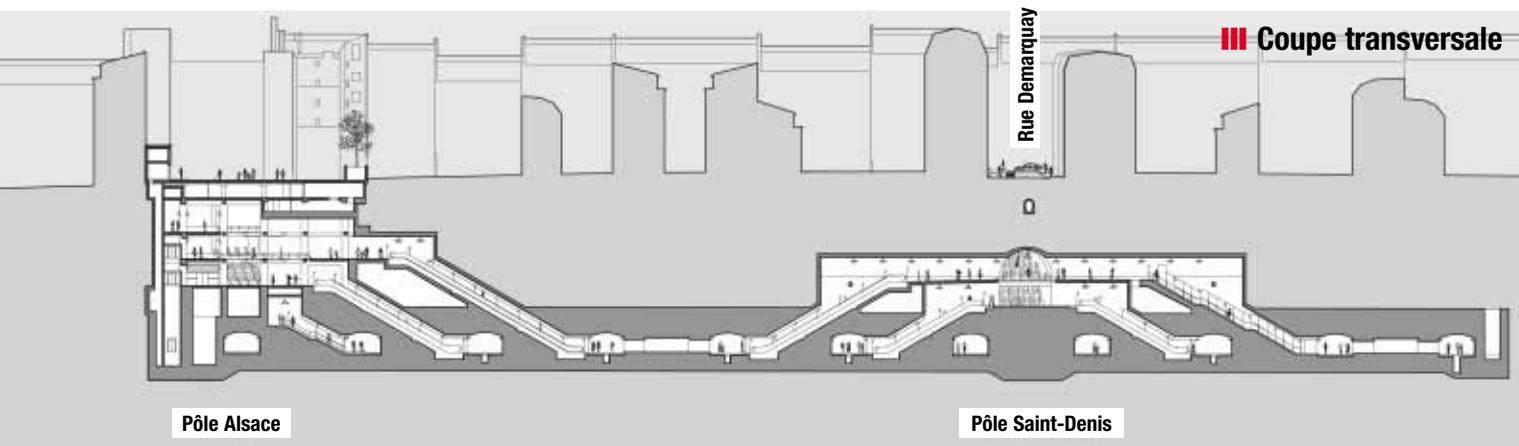


5

>>> ■ 1 Dans la gare Magenta, comme à Haussmann-Saint-Lazare, de larges verrières procurent un éclairage zénithal qui marque le retour à la surface, à la ville. ■ 2 Les structures apparentes participent pleinement de la ligne architecturale. Tout autant que les matériaux, elles expriment la “vérité constructive” de l’ouvrage. ■ 3 Le traitement angulaire des poteaux comme les sections circulaires des poutres sont des éléments récurrents de l’architecture des gares. ■ 4 Le parti pris architectural dégage de larges espaces et joue sur les textures et les couleurs des bétons. ■ 5 La galerie centrale marie un sol en marbre avec une voûte en béton réalisée suivant la technique dite de la voûte active.



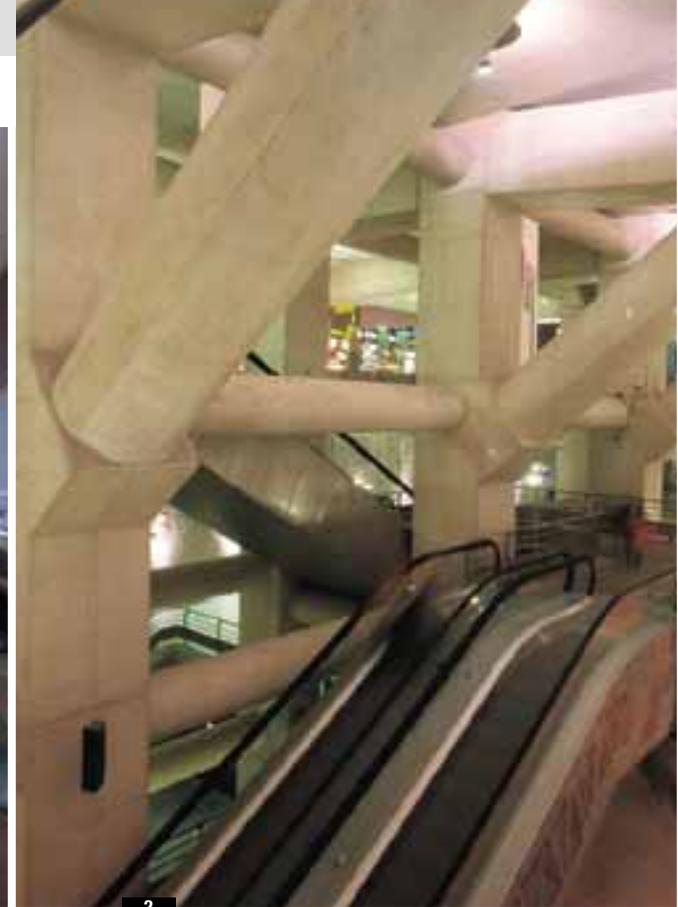
Plan Gare Magenta



III Coupe transversale

Pôle Alsace

Pôle Saint-Denis



Gare Haussmann-Saint-Lazare : des bétons spéciaux

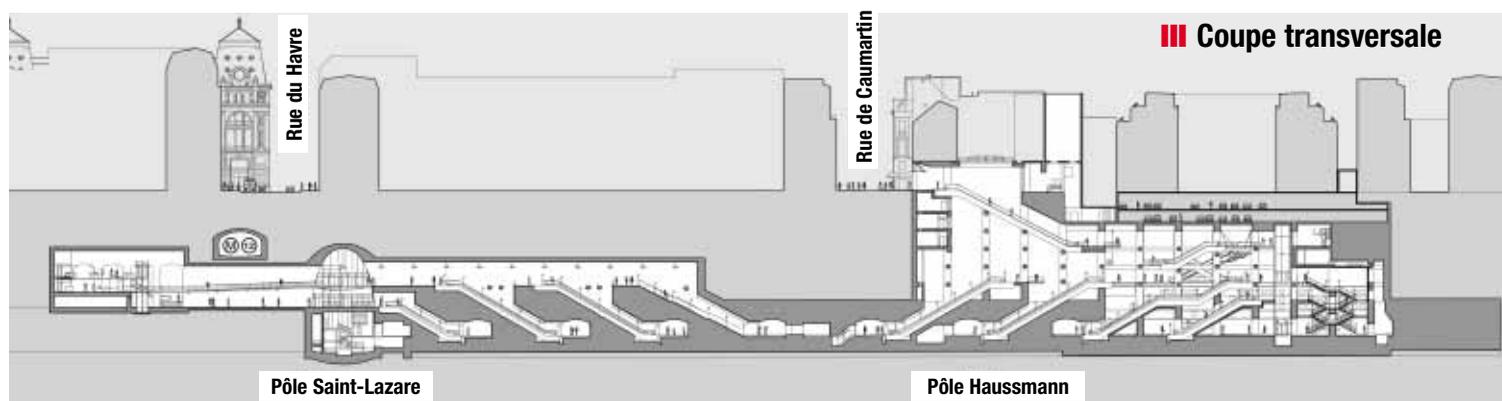
Tout en adoptant une progression générale du bas vers le haut, les travaux de la station Haussmann-Saint-Lazare ont suivi un même principe de galeries d'extrémité provisoires dans lesquelles ont été coulées les futurs appuis, constitués de culées. Les galeries provisoires ont reçu des culées creuses de 6 m de large sur toute la longueur de la gare (225 m), formées de blocs de béton armé comprenant, tous les

20 m, des réservations pour les accès aux quais. Deux piédroits de 1,20 m d'épaisseur en béton B 30 accueillent les réservations des escaliers et des remontées mécaniques à venir. La jonction des piédroits et des culées creuses reprend des efforts importants provenant de la descente de charges (1 000 t/m) et de la poussée hydrostatique de la nappe phréatique (25 t/m²). Le changement de méthode d'excavation en cours de chan-

tier a été l'un des temps forts de l'opération. Le soutènement par des arcs métalliques cintrés a été abandonné au profit d'une méthode associant boulonnage et béton projeté par voie sèche ou humide, pour une meilleure stabilité. La voûte du tunnel central, d'une portée de 21 m, a été coulée en place par cycles de trois jours correspondant à une progression de 2,40 m. Quant aux bétons, ils ont été spécialement formulés pour supporter la

présence d'eaux agressives (ciment CHF - CEM III 52,5 PM-ES) et procurer une résistance à la compression de 20 MPa à 24 h. Notons que les bétons coulés ici ne sont pas revêtus. Ils ont donc fait l'objet d'une attention minutieuse dans leur formulation comme dans leur mise en œuvre, d'où ces protections contre les agressions par des panneaux de contreplaqué et des feuilles de plastique au moment de la mise en œuvre. ■

>>> **1** La proximité des constructions de surface a nécessité de nombreuses reprises en sous-œuvre. **2** Des poutres massives reprennent les descentes de charge des ouvrages "supérieurs" dont la masse est parfois prise en compte pour contrer les effets de poussée de la nappe phréatique. **3** **4** Le béton satiné des structures des halls cède place au béton glacé des galeries d'accès aux quais.





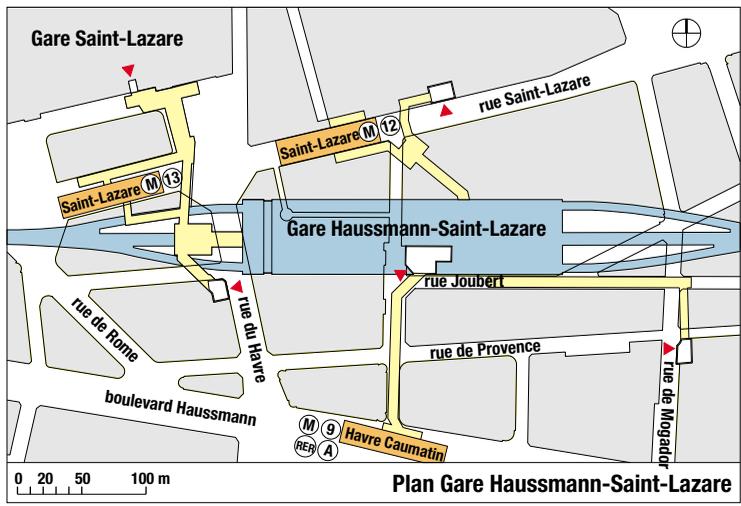
3

4

HISTORIQUE

Construire Haussmann-Saint-Lazare “à pied sec”

Les voûtes des halls Nord et Sud de la station Haussmann-Saint-Lazare se situent à la cote NGF 22, soit 10 m sous le niveau du sol et près de 2 m en dessous de la nappe phréatique libre. Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre ont donc décidé de rabattre cette nappe en dessous du niveau des radiers (- 5 NGF). À cet effet, 24 puits de pompage ont été utilisés qui auront permis le pompage de près de 30 millions de mètres cubes en quatre ans. “L'association du jet grouting et du rabattement a fait la preuve de son efficacité en permettant aux travaux de s'effectuer dans de bonnes conditions”, confirme Henry Weisberger, directeur technique du groupement Sogea.



Architecture façon “grandes lignes”

Les stations Haussmann-Saint-Lazare et Magenta marquent par leurs contrastes, avec les gares parisiennes du siècle dernier, faites de verre et d'acier, mais aussi avec les habituelles stations enterrées du transport au quotidien : espaces, matières et lumières diffèrent du modèle courant et se rapprochent plutôt des dernières nées des gares du TGV. Dues comme ces dernières à l'atelier d'architecture de la SNCF – l'Agence des gares – et à l'architecte en chef Jean-Marie Duthilleul, elles en partagent les préceptes. Elles signent ainsi une volonté d'unité dans le transport ferroviaire et donnent ses lettres de noblesse à la ligne E du RER.

de l'architecte, une “vérité constructive”. Cette idée de vérité se traduit par l'emploi quasi systématique d'un béton coulé en place et non préfabriqué, afin de laisser apparente la trace du travail de l'homme.

● **L'étoffe des bétons**

Le béton brut n'en devait pas moins participer d'une logique architecturale fondée sur une trilogie matériau-couleur-lumière, ses différentes teintes et textures ayant pour but de produire des lumières différentes. Onze qualités de béton ont ainsi été sélectionnées, présentant selon la nature des ciments et des granulats une large palette de teintes et de textures. Parois lisses et rugueuses alternent en fonction des espaces souterrains. Les piédroits des voûtes des quais recourent à un béton bouchardé. Les striures mécaniques laissant apparaître les sables et les granulats blancs de Jouy-le-Châtel pour éclairer la

● **Vérité du béton brut**

Exploiter au maximum la présence du gros œuvre a été une des idées majeures du projet. Les structures ne sont pas masquées mais au contraire mises en valeur afin d'exprimer, selon l'expression



>>> **1** L'harmonie des gares s'appuie sur la définition et l'articulation de différents bétons. En l'occurrence, les bétons glacés des galeries, choisis pour leur douceur, croisent, en s'ouvrant sur les piédroits des quais, des bétons bouchardés piquetés de granulats blancs pour mieux réfléchir la lumière. **2** Le mœlleux des coussins acoustiques recouverts de tissus synthétiques créent une saillie s'inscrivant dans la trame des voussoirs en béton satiné.

matière en accrochant la lumière, tout en exprimant les forces reprises par ces ouvrages. Les grands ouvrages comme les voûtes des quais utilisent du béton satiné. Choisie pour sa faculté à réfléchir les lumières indirectes, cette texture est obtenue grâce au traitement des peaux de coffrage. Enfin, dans les passages étroits où le matériau est très proche des usagers, l'architecte a opté pour un béton glacé gris clair séduisant par son aspect lisse et légèrement brillant. La

technique consiste ici à mettre en œuvre un film plastique entre le béton et le coffrage. Le bois, matériau d'appoint, s'allie avec le béton pour marquer l'univers d'Eole. Présent dans les volets des accès sur rue, il revêt également le traitement acoustique des seuils souterrains de la gare de Magenta ou des correspondances RATP de Haussmann-Saint-Lazare. Il jalonne aussi le cheminement des voyageurs, notamment comme revêtement du plancher des passerelles

métalliques, dont la légèreté contraste avec la monumentalité des halls. La pierre est elle aussi présente. Marbrière, elle remplace avantageusement le traditionnel asphalté au sol ; elle apparaît aussi dans le mobilier, sous forme de bancs pour les quais de la station Haussmann-Saint-Lazare.

● **Un éclairage "domestique"**

La lumière est une composante majeure du projet architectural. Naturelle à l'abord de la surface grâce à de nombreuses verrières, elle devient artificielle en plongeant en profondeur. Les "tubes fluo" sont abandonnés au profit de lustres colorés sur les quais et les halls, de mâts qui balisent les galeries, d'appliques qui soulignent la trame des poteaux. La lumière affirme aussi le caractère colossal des halls en mettant en valeur le rythme des poteaux et des butons, le strict calepinage des joints, et surtout en offrant une "profondeur de champ" qui semble repousser les parois souterraines. ■



Maître d'ouvrage :
SNCF – direction déléguée Eole,
assistée des bureaux d'études
Socotec (bureau de contrôle)
et Méthodes et pilotage
(planificateur)

Maître d'œuvre études :
direction de l'Ingénierie
de la SNCF

Maître d'œuvre travaux :
SNCF, direction des travaux Eole

Entreprises :
• groupement Chantiers
modernes/Dumez (Magenta),
DG Construction/Impreglio
(tunnel) ;
• groupement Sogea avec Spie
Batignolles, Bouygues,
Fougerolle ;
Ballot et Picot
(gare Haussmann-Saint-Lazare)

Plasticien du béton :
Jean-Pierre Aury



>>> **Plus de cinq années de travaux "titanesques" pour ces deux cathédrales de béton brut enfouies dans le sous-sol de Paris.**

TEXTE : PHILIPPE MORELLI
PHOTOS : SNCF, DIRECTION DE LA COMMUNICATION
CENTRE AUDIOVISUEL, DIDIER BOY DE LA TOUR,
ALFRED WOLF, PHILIPPE FREYSSEIX