

Tunnel ferroviaire de Vierzy : vieillesse, altération des maçonneries calcaires

Causes de l'effondrement catastrophique
du 16 juin 1972

M. ARNOULD

Consultant
6, rue Carrière-Marlé
92340 Bourg-la-Reine
marcelarnould@yahoo.fr

Résumé

Le tunnel ferroviaire de Vierzy a été creusé en 1859-1860 dans des sables cuisiers sous 38 m de couverture essentiellement de calcaires lutétiens. L'accident est dû à l'effondrement de 15 m de longueur de voûte maçonnée et de 4 m d'épaisseur de calcaires du Lutétien inférieur. Une première cause est une malfaçon à la construction du clavage de la maçonnerie de la voûte, entre deux sections d'excavation. En 1914 un effondrement volontaire militaire a créé une « cathédrale » de 17 m de haut, 50 m de longueur en axe, 10 000 m³ d'éboulis, à 20 m de la limite sud de l'effondrement de 1972. L'ébranlement a provoqué l'affaissement des formations du Lutétien inférieur sur la voûte. Les fumées de la traction à vapeur ont déposé des suies contenant des sulfures et du charbon imbrûlé dans les vides ainsi créés et dans les hors profils, la maçonnerie et les mortiers caverneux. Ceci a permis le développement d'une altération sulfurique, acide, accélérée par un processus bactérien sur les mortiers et les moellons calcaires et réduit la portance de la voûte. A l'intrados la gélifraction a provoqué des réductions d'épaisseur des moellons tendres et gélifs avec chutes de fragments altérés. Le dégarnissage d'un rouleau de parement dégradé, en briques, purgé pour remplacement par du béton projeté a été la cause finale. Deux trains de voyageurs se sont presque simultanément encastés dans l'éboulis faisant 108 morts. C'est la troisième plus grande catastrophe de l'histoire ferroviaire française.

Mots-clés : tunnel, ferroviaire, effondrement, Lutétien, calcaires, suies, altération, bactéries, gélifraction.

Vierzy railway tunnel: ageing, alteration of calcareous masonry Causes of the catastrophic collapse, June 16, 1972

Abstract

The Vierzy railway tunnel was excavated in 1859-1860 in cuisian sands below 38 m of essentially lutetian limestones. The accident is due to the collapse of the roof of the tunnel on a 15 m long section and of about 4 m thick Lower lutetian formations. The initial cause of the collapse is a defect, at construction time, in the keystone zone of the masonry of the circular vault, at the joint between two sections of excavation. In 1914 a war destruction with explosives created a collapse and a « cathedral » 50 m long, 17 m high, and a cone of 10,000 m³ debris at 20 m of the 1972 collapse. The shaking provoked the sinking of Lower lutetian formations on the masonry, at a distance, Middle Lutetian staying as a slab. Fumes of steam trains deposited soots with coal and sulphides (pyrite) particles in voids of the ground and of the masonry up to in cavernous mortar. This permitted a sulfuric acid alteration, increased by bacterial processes, changing carbonates into soluble sulfates (gypsum). It lowered the resistance of the vault and permitted the fall of quarry stones. At the inner surface freezing caused a progressive fall of debris and reduction of thickness of the masonry. Thin facing rolls of bricks or concrete were placed here and there as a protection. The removing of a section of such a roll of bricks, altered, to be substituted with concrete was the final cause. One limit of the removed section coincides with one limit of the collapse. On June 16, 1972, two passenger trains crossed into the tunnel at a small interval and collided with the cone of debris. There were 108 deaths. It is the third most important catastrophe in French railway history.

Key words: tunnel, railway, collapse, lutetian limestones, soots, alteration, bacteria, freezing.

93

L'accident du 16 juin 1972

Le tunnel de Vierzy, à deux voies, est situé sur la ligne Paris-Soissons à environ 10 km au sud de Soissons. Après 31 trains dans la journée, une locomotive haut le pied est passée dans le tunnel à 20 h 23 sans relever d'anomalie. A 20 h 55 un autorail venant de Paris à sa vitesse normale de 108 km/h s'est encastré dans une masse éboulée. Dans l'autre sens à 20 h 56 un autorail venant de Laon a fait de même à 90 km/h. Bilan : 108 morts et 110 blessés. C'est la troisième plus grande catastrophe de l'histoire ferroviaire en France. Selon l'axe du tunnel l'éboulement a affecté 15 m linéaires de voûte entre les PK 94,760 et 94,775. L'éboulis d'un volume total de 460 m³ a atteint 5 m de hauteur maximale au-dessus du niveau du rail et la cloche d'effondrement 5 m au-dessus de l'intrados du tunnel.

Le tunnel : projet, reconnaissance et construction

Le tunnel de Vierzy a été construit en 1860-1861 par la Compagnie du chemin de fer du Nord. Il a une longueur de 1 401 m de long (PK 94,208 à PK 95,609).

Le tracé en plan (Fig. 1) comporte des courbes probablement imposées par la topographie du recouvrement.

Le profil en long (Fig. 2) a une pente régulière de 3 mm/m du sud vers le nord, à l'inverse du pendage général, faible, du Bassin parisien.

Le creusement dans les sables fins du Cuisien sous une couverture de calcaires lutétiens.

En section transversale (Fig. 3) l'ouvrage fait 8 m de largeur entre des piédroits verticaux de 2 m de haut en intrados. Une voûte circulaire maçonnée de 4 m de rayon s'appuie sur les piédroits. Le tunnel a donc 6 m de hauteur en axe. Il n'y a pas de radier.

La reconnaissance préalable a été faite en 1857-1859 par sept puits verticaux de 4 à 5 m de diamètre dans l'axe du tunnel et par deux galeries de 2,15 m de large et de haut au-dessus du futur tunnel : l'une de 600 m partait de l'entrée nord, l'autre partait de l'entrée sud vers le nord sur 280 m.

La planification du creusement des tunnels avec les moyens de perforation et d'aération de l'époque consistait à créer grâce à des puits intermédiaires foncés jusqu'au niveau de l'ouvrage et dans son axe autant de points d'attaque qu'il en fallait en plus des deux entrées pour un achèvement dans des délais de l'ordre de 30 mois avec des avancements de 12 à 15 m par mois. Ici 5 sections étaient prévues : deux de 250 m, à partir de chacune des entrées et trois de 300 m chacune desservie par trois puits de service. Les documents d'archives donnent des indications parfois contradictoires. Ainsi la section commençant à l'extrémité nord aurait eu 325 m de long, suivie d'une section de 250 m. Le creusement a été particulièrement rapide. Il a duré 22 mois et demi, du début janvier 1860 au 15 novembre 1861. Il a été exécuté avec la méthode belge en commençant par une galerie de faite, de 3 m sur 3, boisée, ensuite élargie en voûte avec étaillage puis creusement du stross et confection des piédroits et de la voûte maçonnée.

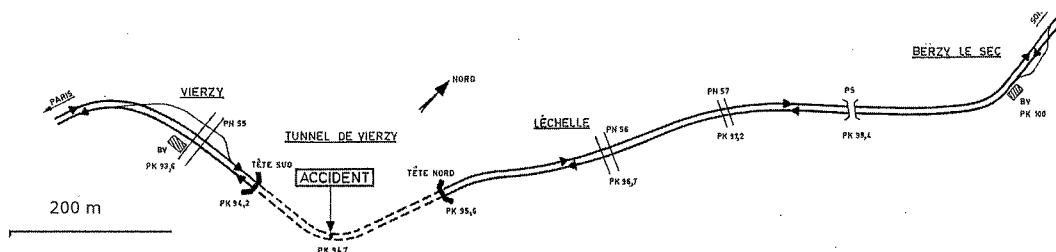


FIG. 1 Tracé en plan (Archives SNCF).
Horizontal alignment.

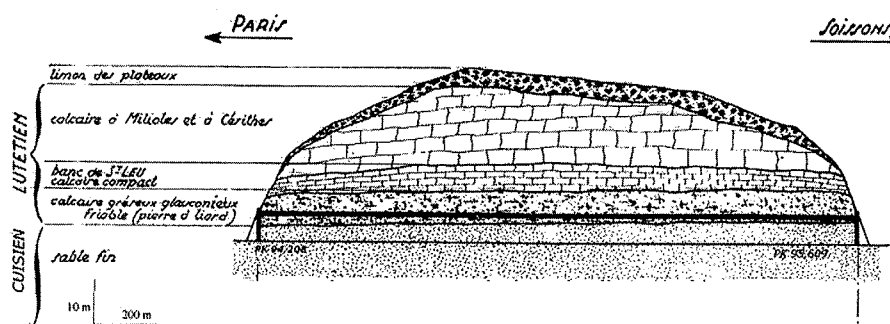
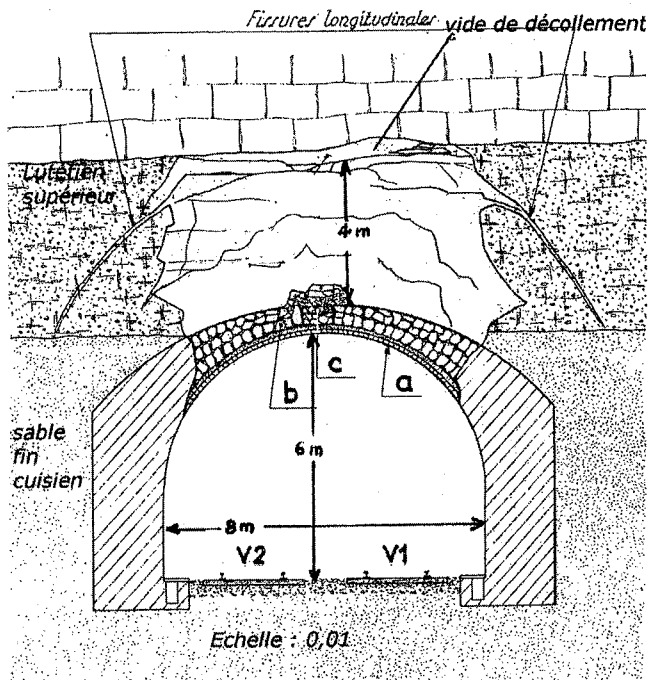


FIG. 2 Profil en long et coupe géologique simplifiée du projet (Archives SNCF).
Longitudinal profile and simplified geological cross section.



- a** : Contrevoûte en briques filées en cours de démolition
b : maçonnerie de moellons calcaire
c : blocage de moellons

FIG. 3 Profil en travers du tunnel et coupe transversale de la cloche d'effondrement, lèvre sud (Archives SNCF).
 Transverse profile of the tunnel and of collapse limits.

3

Géologie

3.1

Stratigraphie et lithologie

Nous sommes dans le Tertiaire du Bassin parisien, plus précisément dans l'Éocène, étages Lutétien et Cuisien. Une coupe simplifiée de la colline selon le profil en long du tunnel (Fig. 2) montre sous une couverture de formations superficielles un massif de calcaires lutétiens surmontant des sables cuisien dans lesquels est creusé le tunnel. Celui-ci est donc censé avoir un toit de calcaire lutétien. Le contact Lutétien/Cuisien paraît plan et subhorizontal.

La réalité est un peu différente. Le contact entre Cuisien et Lutétien présente des ondulations (Fig. 5) ce qui, outre son contre pendage, conduit le tunnel à pente régulière à ne pas rester inscrit exactement dans le même niveau.

Du point de vue stratigraphique et lithologique et du haut vers le bas on rencontre, sous les champs cultivés et les formations superficielles de la colline :

- Lutétien supérieur, pour mémoire, alternance de niveaux marneux et de bancs durs (caillasses) ;
- Lutétien moyen, ensemble rocheux, calcaire, avec une superposition de bancs de faciès un peu différents, tous exploités comme matériaux de construction dans

toute la région parisienne. Notamment, ici, du haut vers le bas : le banc royal, réputé le meilleur, le Vergelé avec un banc « à vérins » puis, à la base du Lutétien moyen, un banc de 3 à 6 m d'épaisseur, le « calcaire de Saint-Leu ». C'est ce banc qui constitue la dalle visible au toit de la cloche d'effondrement (Fig. 3). C'est un calcaire tendre et gélif. Néanmoins il a été largement utilisé régionalement dans le bâtiment. Dans le tunnel la grande majorité des moellons employés sont en calcaire de Saint-Leu : 87 % de la longueur des sondages carottés dans la maçonnerie ont recoupé des moellons de ce calcaire.

Une carrière souterraine abandonnée de part et d'autre au-dessus du tunnel a exploité les principaux bancs de calcaire dont le banc royal et le calcaire de Saint-Leu. On y accédait par un puits également abandonné mais elle reste accessible par la « cathédrale » ancienne cloche d'effondrement d'une destruction militaire en 1914 (cf. § 6). Cette carrière ne s'étend pas jusqu'à l'effondrement. Elle s'arrête à environ 5 m de sa lèvre sud.

- Lutétien inférieur (Fig. 4). Environ 5 m d'épaisseur totale. Sous le calcaire de Saint-Leu vient d'abord un banc de lumachelles - accumulation de coquilles de Lamellibranches consolidées en roche tendre, avec abondance de Nummulites d'où le nom de « pierre à liards » vers la base du banc dont l'épaisseur peut atteindre 1 m. On continue vers le bas par une alternance de bancs calcaires alternativement durs et tendres, souvent sableux, sur environ 2,5 m. Puis 1 à 2 m d'une formation de faluns, sables coquilliers à ciment sableux ou sablo-argileux, parfois cimentés en lentilles mais carrément pulvérulents à leur base. Marqué par la présence de glauconie, verte, cet ensemble de formations plus ou moins sableuses d'environ 2 m d'épaisseur est dénommé « glauconie grossière ». Le passage aux sables cuisien siliceux sous-jacents se fait par un mélange de sables calcaires et siliceux, produits du remaniement du sommet du Cuisien. La totalité des formations du Lutétien inférieur se retrouve en désordre dans le cône d'éboulis. On a pu y constater qu'au moins un quart du volume total était sableux. Le Lutétien inférieur comporte donc dans sa partie supérieure des bancs de calcaire compact intercalés avec des niveaux de roches tendres ou/et friables. Ils ont pu être confondus par les constructeurs avec la véritable dalle du calcaire de Saint-Leu. Il a pu en aller de même avec des lentilles consolidées dans la « Glauconie grossière » friable et sableuse.

Les parois de la cloche d'effondrement montrent que la voûte est essentiellement dans la « Glauconie grossière » et que le haut de la voûte avec l'encoche de la galerie de façade atteint un banc de calcaire au-dessus du sommet de la « Glauconie grossière ». Il n'y a donc guère plus de 3 m à 3,50 m de recouvrement jusqu'au vide ouvert sous la dalle du calcaire de Saint-Leu à laquelle une partie des lumachelles du sommet du Lutétien inférieur reste attachée. Moins de 4 m en toute hypothèse.

- Cuisien. Alors que tout le Lutétien est calcaire, le Cuisien est représenté par des sables siliceux fins assez homogènes qui se poursuivent assez profondément sous le radier du tunnel. Dans leur partie supérieure la présence de quelques minces couches d'argile sur les 2 à 2,5 premiers mètres les a fait identifier sous le nom d'« argiles de Laon ».

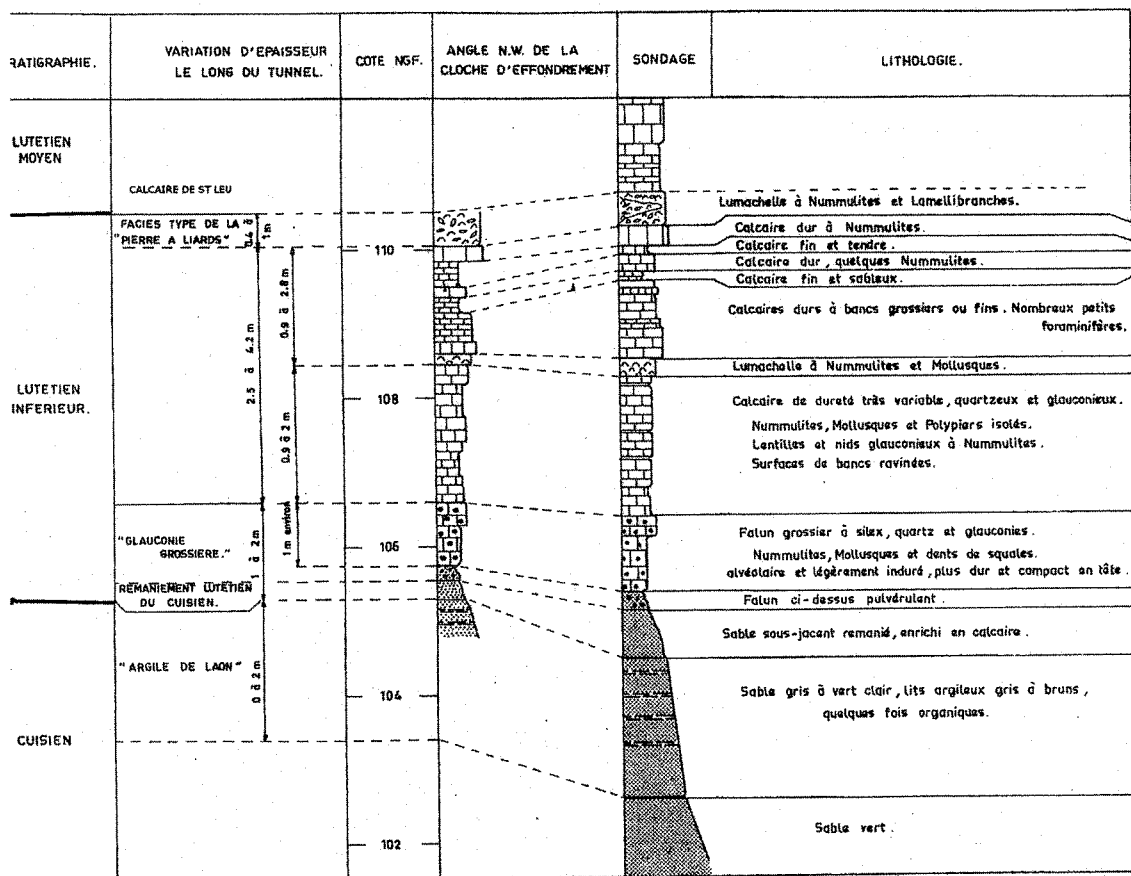


FIG. 4 Logs du Lutétien inférieur (d'après Pellerin, 1978).
Geological logs of lower Lutetian.

3.2

Données structurales

Le contact Lutétien-Cuisien n'est pas subhorizontal comme attendu. Il présente des ondulations bien visibles (Fig. 5).

4

Hydrogéologie

Le tunnel est hors d'eau. On y observe uniquement des infiltrations d'eaux de surface dont le temps de transit est de l'ordre du mois sous forme de suintements et traces d'humidité. Les rares ruissellements sont drainés par les caniveaux.

5

Karstification des calcaires lutétiens. Vides et dépôts de suie dans le lutétien inférieur

Des cavités de dissolution karstique sont connues dans les calcaires lutétiens de la région. Mais il n'y en a pas dans le massif au-dessus du tunnel. J'en ai personnellement recherché sans succès. Il existe seulement

quelques rares rubéfections de surfaces de fissures ou de leur remplissage. Ceci est logique. Le tunnel est à l'aplomb d'un point haut. L'infiltration est insuffisante pour des dissolutions significatives.

Par contre les 5 m d'épaisseur du Lutétien inférieur présentent des vides dus à la construction et aux avatars de la vie du tunnel :

- un important vide longitudinal de 0,30 à 0,50 m de hauteur sépare la dalle du calcaire du Lutétien de Saint-Leu du sommet du Lutétien inférieur affaissé. Il a été découvert dans la coupe offerte par la cloche d'effondrement. Il se prolonge au moins jusqu'à la « cathédrale ». Il est tapissé de suie. Il est donc ancien et bien antérieur à l'effondrement de 1972. Il est vraisemblablement une conséquence de la destruction militaire volontaire de septembre 1914 qui a créé la cathédrale. L'explosion de mines placées au niveau de l'ancienne carrière souterraine a pu provoquer le décollement de l'ensemble du Lutétien inférieur et son affaissement vertical en écrasant la galerie de reconnaissance (cf. § 6) ;

- de nombreux vides marqués de suie sont dans l'épaisseur des terrains du Lutétien inférieur. Ils étaient bien visibles dans les parois de la cloche d'effondrement, dans les joints de stratification. Beaucoup d'autres ont été reconnus grâce aux nombreux sondages postérieurs à l'accident de 1972 (Fig. 5). La plupart sont partiellement ou totalement remplis de suies déposées par les fumées de la traction à vapeur qui n'a disparu qu'en 1965 au profit de la traction diesel. Ces dépôts sont impressionnants. Ce ne sont pas des films. On observe des accumulations de plusieurs centimètres

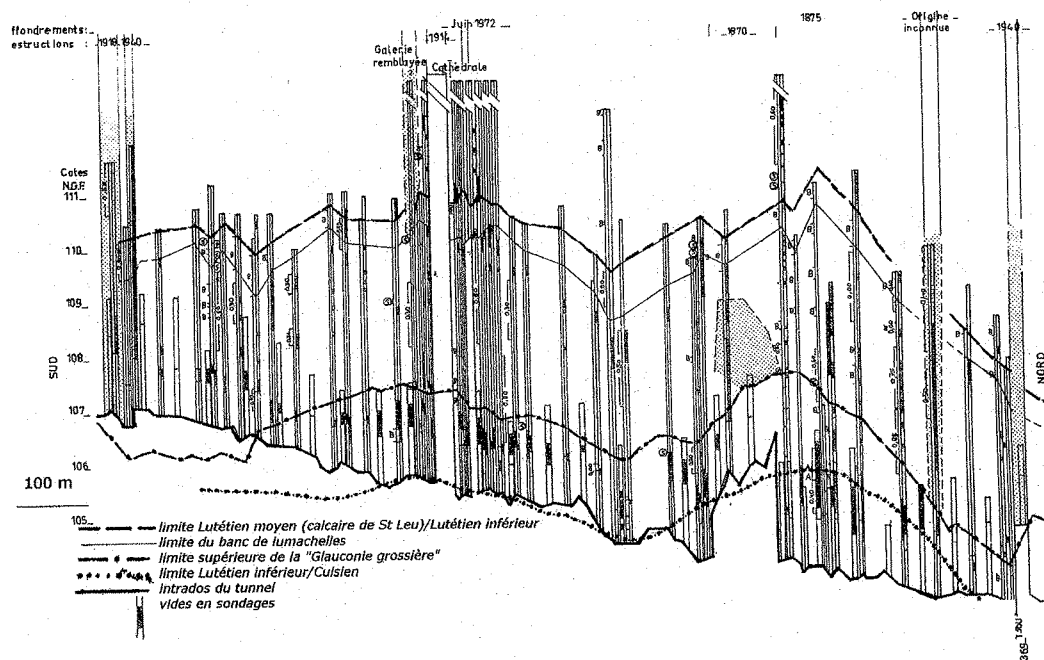


FIG. 5 Coupe géologique du tunnel et vides dans les sondages (d'après archives SNCF et Pellerin, 1978).

Geological cross section of the tunnel and voids in boreholes.

d'épaisseur. En moyenne selon F.-M. Pellerin (1978) il y a 20 cm de vide par sondage en clé, mais 5 sondages sur 39 n'en ont pas rencontré. Il est vraisemblable que ces vides correspondent à des décollements irréguliers entre différents niveaux du Lutétien inférieur. Leur origine est à rapprocher de celle du décollement principal indiqué plus haut. L'observation des éboulis a montré des blocs aplatis, de diverse nature, avec des couvertures de suies. Il est également vraisemblable que le talutage des sables cuisien (voire de la base du Lutétien inférieur) a contribué à ces décollements ;

– des dépôts de suies sont également abondants à l'extrados du tunnel, dans les hors-profil, sur les moellons de bourrage et au sein de la maçonnerie elle-même, dans des fissures et jusque dans des parties cavernueuses des mortiers.

Ces vides forment un réseau dans lequel les fumées ferroviaires se sont propagées comme dans une cheminée à des distances, notamment horizontales, de plusieurs dizaines de mètres. Ceci a été confirmé par un essai le 6 octobre 1974. Une cartouche fumigène d'une durée de 10 minutes a été introduite à 1,50 m dans un forage vertical en clé au PK 94,805, à 30 m de la limite nord de la cloche d'effondrement (PK 94,775). La fumée a atteint le décollement au toit de la cloche d'effondrement après seulement 3 minutes.

6

La cloche d'effondrement et l'éboulis

La cloche d'effondrement a une hauteur maximale de 5 m au-dessus de l'intrados du tunnel et une longueur de 15 m selon son axe longitudinal (PK 94,760 à PK 94,775). Sa lèvre sud est à l'aplomb exact de la limite d'une section d'un chantier de réfection d'une contre-

voûte en briques dégradée et purgée à l'intrados du tunnel, restée provisoirement dégarnie deux mois avant l'accident avant son remplacement par du béton projeté. La limite entre le 2^e et le 3^e lot de construction est donnée entre les PK 94,755 et PK 94,760, donc sensiblement à la lèvre sud de l'effondrement. Selon d'autres documents d'archives elle pourrait aussi être dans les 5 premiers mètres de la zone effondrée, côté nord. On sait que la confection de la voûte maçonnée et du clavage de clé sont particulièrement difficiles au raccord de lots dont les attaques partaient en sens opposé.

Le toit de la cloche est la dalle du calcaire de Saint-Leu, base du Lutétien moyen à laquelle reste soudée une certaine épaisseur des lumachelles du sommet du Lutétien inférieur. C'est cette dalle, qui est en réalité constituée par l'ensemble du Lutétien moyen, que les constructeurs auraient aimé avoir au toit du tunnel.

L'examen des parois montre que les naissances de la voûte commencent dans des sables verts mais encore calcaires, extrême base du Lutétien inférieur, transition avec le Cuisien. Au-dessus on identifie la « glauconie grossière ». Le sommet de la voûte et l'encoche de la galerie de faite sont dans un calcaire coquillier. On peut en conclure que seules les formations du Lutétien inférieur se sont éboulées. En clé, leur épaisseur n'est guère plus de 3 à 3,5 m ; inférieure à 4 m.

Sur les parois de la cloche, le vide d'environ 0,30 à 0,50 m de hauteur mentionné plus haut, tapissé de suie, s'enfonce sous la dalle du calcaire de Saint-Leu vers le sud et vers le nord selon l'axe du tunnel. On a pu montrer qu'il est continu jusqu'à la cathédrale, environ 20 m au sud. D'autres vides remplis ou soulignés de suie sont visibles dans les parois.

Enfin, côté sud, la partie hourdée (liée au mortier, un peu sommairement) est réduite à une épaisseur de 0,20 m (au lieu des 0,70 m attendus) sur plus de 1 m de large. Il y a eu mauvaise exécution – malfaçon – lors de la construction.

Les éboulis sont très sableux, calcaires, avec des blocs dont certains, friables, se sont effrités, des moellons et des blocs de maçonnerie. Tous les niveaux stratigraphiques du Lutétien inférieur s'y trouvent mélangés. Certains blocs se trouvaient en position verticale. Le volume total des éboulis a été évalué à 460 m³.

7

Vieillessement. Avatars significatifs de la vie du tunnel

7.1

Destructions militaires

La liste est impressionnante :

- 1870 : destruction par mines de deux tronçons de 30 m et de 14 m de long, entre les km 95,120 et 95,220, la position exacte n'est pas connue avec précision, suivie de reconstruction en 1873 ;
- 1^{er} septembre 1914, cinq « fourneaux de mines » placés au plancher de la carrière souterraine de calcaire, citée au § 3, ont provoqué un effondrement sur 50 m de longueur en axe entre les km 94,690 et 94,740 et 17 m de hauteur. 10 000 m³ d'éboulis ont été abattus (à comparer aux 460 m³ de 1972). Les piliers de la carrière ont été fissurés. Ils ont dû être renforcés et d'autres piliers ont dû être construits pour soutenir le toit. Le plancher de cette carrière étant en calcaire de Saint-Leu, sa vibration a pu provoquer le décollement des formations sous-jacentes du sommet du Lutétien inférieur, ce décollement se prolongeant jusqu'à la zone de l'effondrement de 1972 à une vingtaine de mètres de distance et au-delà ;
- juillet 1918, destruction d'un tronçon de 40 m au voisinage de la tête sud entre les km 94,210 et 94,250 ;
- 9 juin 1940, aux deux extrémités, km 94,250 à 94,280 et 95,550 à 95,570.

7.2

Rescindement

En 1957 le souterrain a été rescindé, par places, pour dégager le gabarit « TZ » et permettre le transport de gros matériels militaires. La zone de l'accident de 1972 n'aurait pas été concernée.

7.3

Éboulement de 1875

Un compte rendu en archives fait état d'un éboulement le 24 janvier 1875, à 315 m de la tête nord, à l'aplomb exact d'un puits noté « Puits n° 2 ». Cette numérotation indiquerait un puits d'extraction. On serait donc là encore à la jonction entre deux lots d'excavation. Mais ceci s'accorde mal avec la distance de l'entrée nord : 315 m alors que la longueur de cette section d'entrée est de 250 m dans le projet. S'agirait-il plutôt d'un puits de reconnaissance qui aurait dû être noté par une lettre majuscule ? Le volume de déblais n'est pas indiqué. Selon un croquis la cloche de fontis avait un volume

sensiblement inférieur à celui de 1972. L'origine de l'instabilité a été attribuée à un défaut de boisage de la base du puits. « Heureusement aucun train ne passait à ce moment et on a pu arrêter à temps le train de Paris ».

8

La voûte en maçonnerie

En section la voûte hémicirculaire de l'ouvrage a un rayon de 4 m. Elle s'appuie sur des piédroits verticaux de 2 m de hauteur et de 1,40 à 1,75 m d'épaisseur. Dans l'axe la clé de voûte est à 6 m au-dessus du radier. Elle est constituée de moellons calcaires appareillés liés par un mortier à la chaux. Les moellons sont essentiellement du calcaire de Saint-Leu, local, malheureusement tendre et gélif. Le mortier est fait de sables issus de l'excavation et de chaux de Tournai.

La voûte était censée avoir une épaisseur totale de 1,40 m à 1,70 m aux naissances et de 0,70 m à 0,90 m en clé. Un rouleau de parement épais de 0,20 m en briques cuites sur place liées par un mortier était quelquefois ajouté à l'intrados. À l'extrados, des moellons non taillés plus ou moins liés par un mortier de chaux étaient utilisés en remplissage de vides de construction (hors profil, parties résiduelles de la galerie de faite...). Ces épaisseurs n'ont pas toujours été respectées. Un sondage à quelques mètres de l'éboulement côté sud n'a recoupé que 0,55 m de moellons appareillés surmontés de 0,20 m de moellons liés par un mortier de chaux. À la lèvre sud de la cloche d'effondrement il n'y avait que 0,20 m de moellons mal équarris, hourdés à la chaux, sur 1 m de longueur.

9

Altérations des maçonneries

Pratiquement dès la mise en service et tout au long du temps la maçonnerie a souffert de problèmes d'altération se manifestant par des chutes de débris de moellons et de briques notées au passage des convois et lors des visites de surveillance. Dès 1876 des documents d'archives mentionnent des effritements de moellons atteignant 15 cm d'épaisseur et des revêtements de briques montrant aussi des desquamations et des écaillages. Un grand nombre de zones ont ainsi été identifiées par des campagnes successives de surveillance, purgées et remplacées selon diverses techniques de réfection. Ainsi un compte rendu de visite en octobre 1959 relève des avaries des parements de brique, des disjointoiements et des exfoliations de moellons sur au moins 2 cm, des mortiers désagrégés en poudre ou en pâte. Un autre, du 11 mai 1964, a relevé des descellements de moellons et de nombreuses dégradations des revêtements de la voûte et des piédroits. Diverses réclamations émanent de mécaniciens suite à la chute de débris. L'une d'elles fait spécifiquement suite à une chute de moellon.

10

Causes des altérations des maçonneries

Deux causes principales sont clairement identifiées : gélifraction et attaque sulfurique acide des carbonates.

Gélifraction

Les jets de vapeur et de gaz brûlants émis par les locomotives à des températures de 150 à 400 °C ont certainement joué un rôle d'érosion mais il n'a pas été étudié. Par contre les effritements superficiels des moellons calcaires sont caractéristiques des effets du gel. En hiver la température peut descendre jusqu'à -13° à l'intérieur du tunnel et -18° près des têtes.

Attaque biochimique acide des carbonates

On connaît la « maladie de la pierre » des matériaux de construction calcaires. En présence d'humidité l'oxydation de sulfures (essentiellement pyrite) présents dans le matériau ou dans des imbrûlés de charbon des suies provoque une attaque sulfurique acide du calcaire et sa transformation en sulfates, essentiellement en gypse, solubles. Ainsi, en surface, les pierres calcaires ont une croûte externe riche en gypse, le calcin, recouvrant une zone plus ou moins pulvérulente qui passe progressivement à la roche saine. Le même processus a opéré sur les moellons et sur les mortiers de chaux, carbonatée, du tunnel, à l'intrados, comme sur des murs de bâtiments mais surtout dans les fissures de la maçonnerie, à l'extrados et dans l'intérieur du terrain par les réseaux de vides avec dépôts de suie décrits au § 4. La démonstration en est faite par l'analyse des eaux souterraines. A quelque distance du tunnel elles ne contiennent pas de sulfates. Celles qui sont recueillies dans le tunnel en contiennent.

L'attaque sulfurique acide des carbonates est accélérée par des bactéries anaérobies, acidophiles, notamment du genre *Thiobacillus* qui tirent précisément leur énergie de la réaction d'oxydation des sulfures et leur substance du carbone des carbonates voire, ici, également de charbon imbrûlé. Leur présence a été recherchée, après l'accident, en utilisant des méthodes mises au point à l'Institut Pasteur. Le tableau I montre leur grande abondance là où il y a des suies.

L'altération biochimique acide des carbonates, alimentée en sulfures par les suies déposées par les

fumées ferroviaires, a certainement été très pernicieuse dans les vides à l'extrados du tunnel et dans toutes les fissures de la maçonnerie, notamment celles qui ont pu être engendrées par l'ébranlement dû aux explosifs utilisés pour la destruction militaire de septembre 1914. Cette altération a pu contribuer à une certaine réduction de taille des moellons. Elle a surtout entraîné une dégradation des mortiers de chaux conduisant au descellement de moellons.

Conclusion. Causes de l'accident

La cause de l'accident du 16 juin 1972 est un effondrement de la voûte du tunnel dû à un enchaînement de causes de diverses natures qui se sont succédé au fil du temps et du vieillissement de l'ouvrage. Après la catastrophe la SNCF a entrepris des recherches approfondies : 5 forages verticaux depuis la surface du sol ; plus de 100 forages à partir du tunnel dans le terrain et dans la maçonnerie ; ouverture de nombreuses fenêtres ; essais divers ; thèses de doctorat. Un important document de référence, le rapport de la Commission d'Enquête Administrative publié en avril 1973, a fait la synthèse des connaissances à cette date. A lui seul l'examen des parois de la cloche d'effondrement a été riche d'enseignements. Il est donc évident que le niveau des connaissances après le drame n'est pas comparable à ce qu'il était avant.

Appelé par la SNCF aussitôt après la catastrophe en qualité de conseil pour la géologie, j'ai suivi ces recherches jusqu'au procès qui a suivi où j'ai été l'un des cinq témoins cités par la Société. Tous les résultats n'étaient pas encore acquis à cette date. La rédaction du présent article me fournit l'opportunité de faire un point plus complet. Voici, à ce jour, mes conclusions sur les causes.

Au stade du projet le profil en long aurait pu être mieux adapté à la coupe géologique pour tenir compte de la cote du calcaire lutétien supérieur, comme toit potentiel de l'ouvrage et du caractère sableux des deux derniers mètres du Lutétien inférieur. A la construction le choix de moellons en calcaire de Saint-Leu, tendre et gélif, avec encore sa teneur en eau de carrière, s'est avéré lourd de conséquences pour la maintenance de l'ouvrage du fait de la gélifraction.

TABLEAU I

Variation d'abondance de Thiobacilles sur des calcaires avec suie et sans suie dans le tunnel de Vierzy (Arnould, 1988).

		Thiobacilles Nombre de germes par gramme de pierre sèche
Échantillons de référence du calcaire lutétien (carrière d'origine)		20
TUNNEL	Éch. 1 : poudre, localisation dans le massif calcaire en relation indirecte avec le tunnel par les fissures	1 000
	Éch. 2 : croûte sans suie sur le calcaire du massif en relation directe avec le tunnel par une fissure	2 500
	Éch. 3 : croûte avec suie, sur moellons calcaires à la base d'une cheminée d'aération du tunnel	400 000