



INVENTAIRE TUNNELS

FICHE TUNNEL

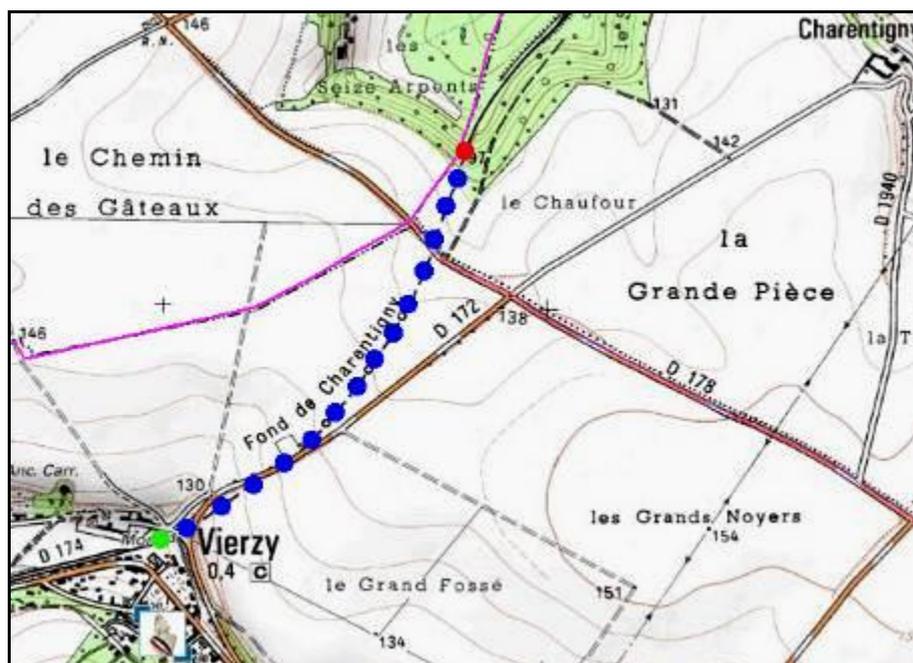
N° INVENTAIRE : **02799.1** NOM : Tunnel de Vierzy

SECTION de LIGNE : **02216.01N**

COMMUNES : **Entrée : Vierzy (02)** **Sortie : Villemontoire (02)**

COORDONNEES : **X : 669,079** **X : 669,854**
Lambert II Etendu **Y : 2477,606** **Y : 2478,695**

Altitude moyenne : **100 m**



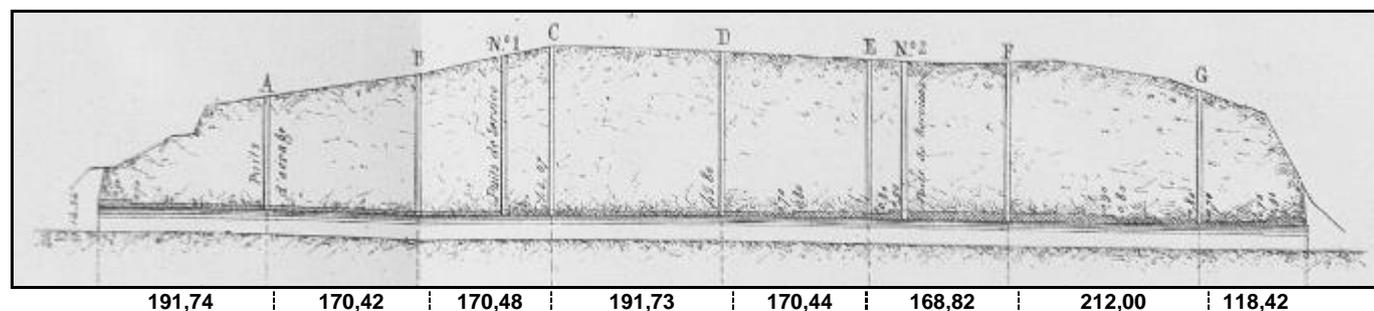
DONNEES TECHNIQUES :

Nature de l'ouvrage : **Vrai tunnel de percement**
Longueur : **1394 m**
Nombre de voies : **2 (1)**
Usage actuel : **En service (accès dangereux)**
Etat général accès : **Ligne en service (accès dangereux)**
Etat général galerie : **Bon**

COMMENTAIRES :

Aussi appelé tunnel de l'Ancien Tournais, le tunnel de Vierzy, alors à double voie, était primitivement équipé de 7 puits d'aération et d'un parement en briques.

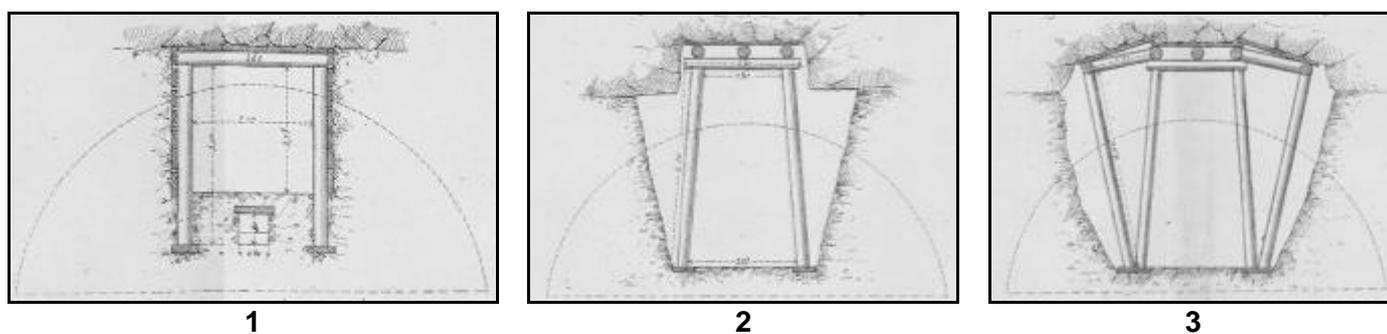
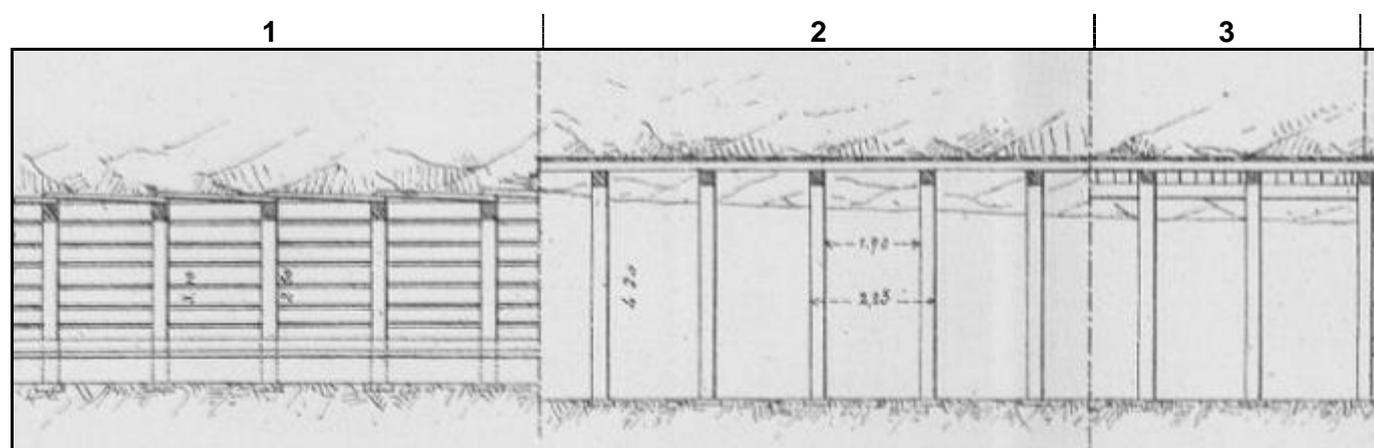
Adjugés le 20 janvier 1860, les travaux de percement ont été exécutés selon une méthode classique : réalisation d'une galerie de reconnaissance, réalisation de la voûte, abaissement du radier et réalisation des piédroits depuis les deux extrémités, ainsi que par 2 puits d'extractions équipés chacun d'un monte-charge hydraulique. La fin du chantier, initialement prévue le 15 octobre 1861, n'aurait pris qu'un moins de retard !



Ci-dessus, profil du tunnel localisant les 7 puits d'aération (A à G),
avec la distance entre chacun d'eux
Le plan localise également les 2 puits d'extraction (n°1 et 2)

Les 3 premières étapes du percement du tunnel de Vierzy sont présentées ci-après :

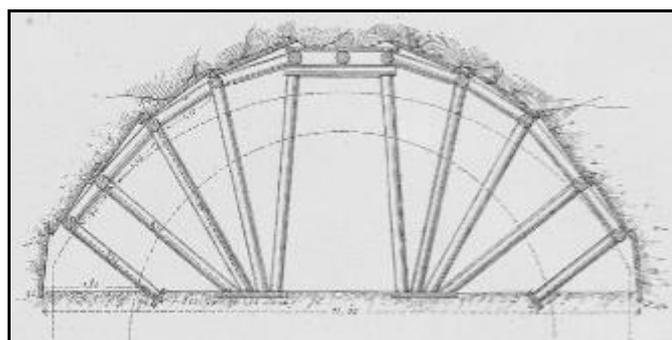
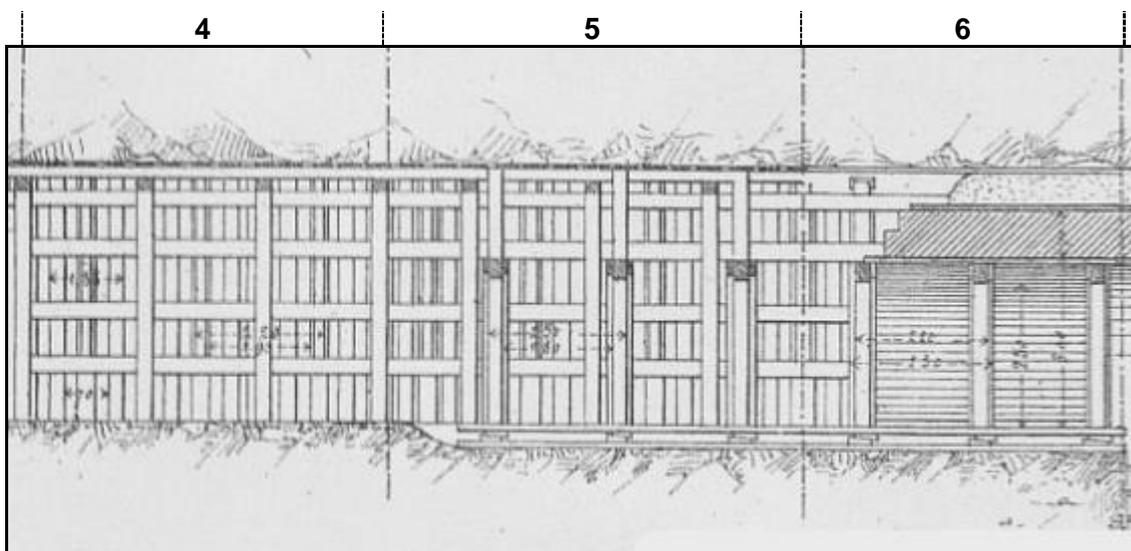
- 1) Établissement de la galerie de reconnaissance primitive, de 2,15 m de haut sur 2,10 m de largeur
- 2) Création de la galerie d'exécution par excavation du ciel
- 3) Fonçage dans le ciel en élargissement latéralement la galerie d'exécution.



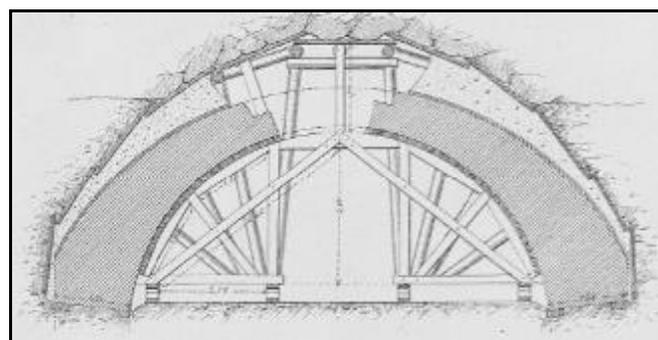
Les pointillés matérialisent la voûte de la future galerie

Les étapes suivantes sont présentées ci-après :

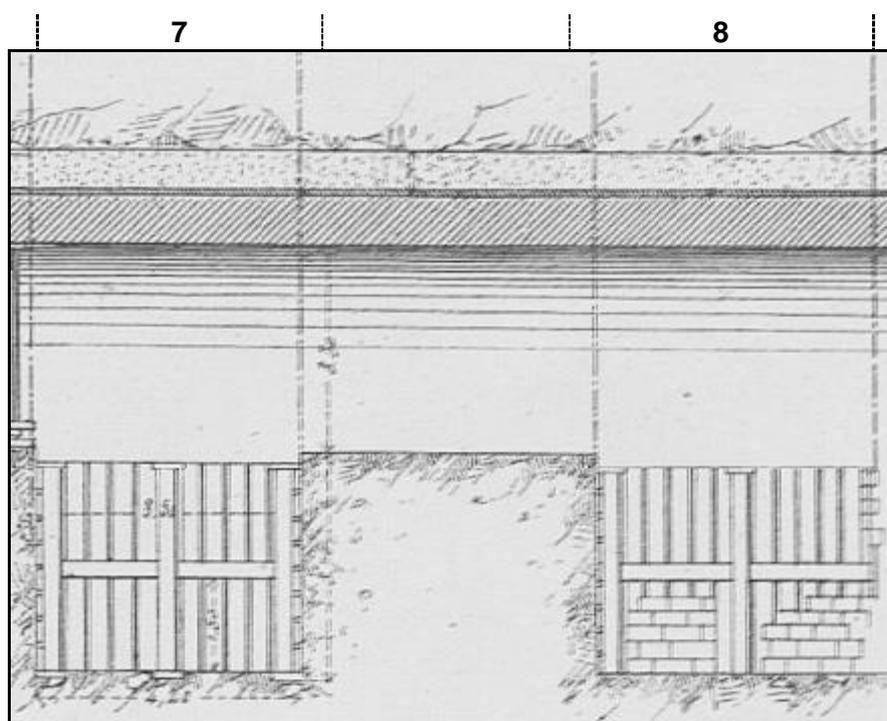
- 4) Elargissement du ciel de la galerie d'exécution
- 5) Pose des cintres
- 6) Exécution de la voûte
- 7) Fouilles des pieds-droits jusqu'à 6,50 m au-dessous de la clé de voûte
- 8) Exécution des pieds-droits en sous-œuvre sous la voûte.



4

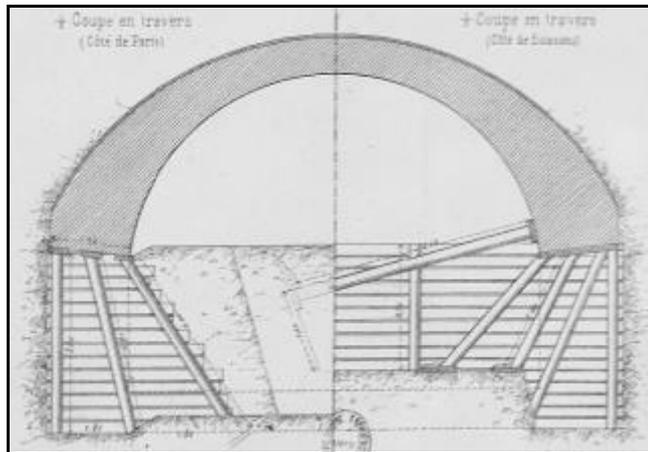


5 - 6

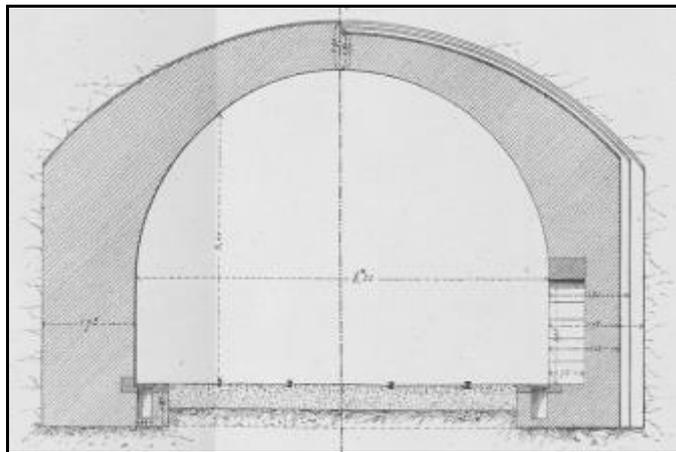


7

8

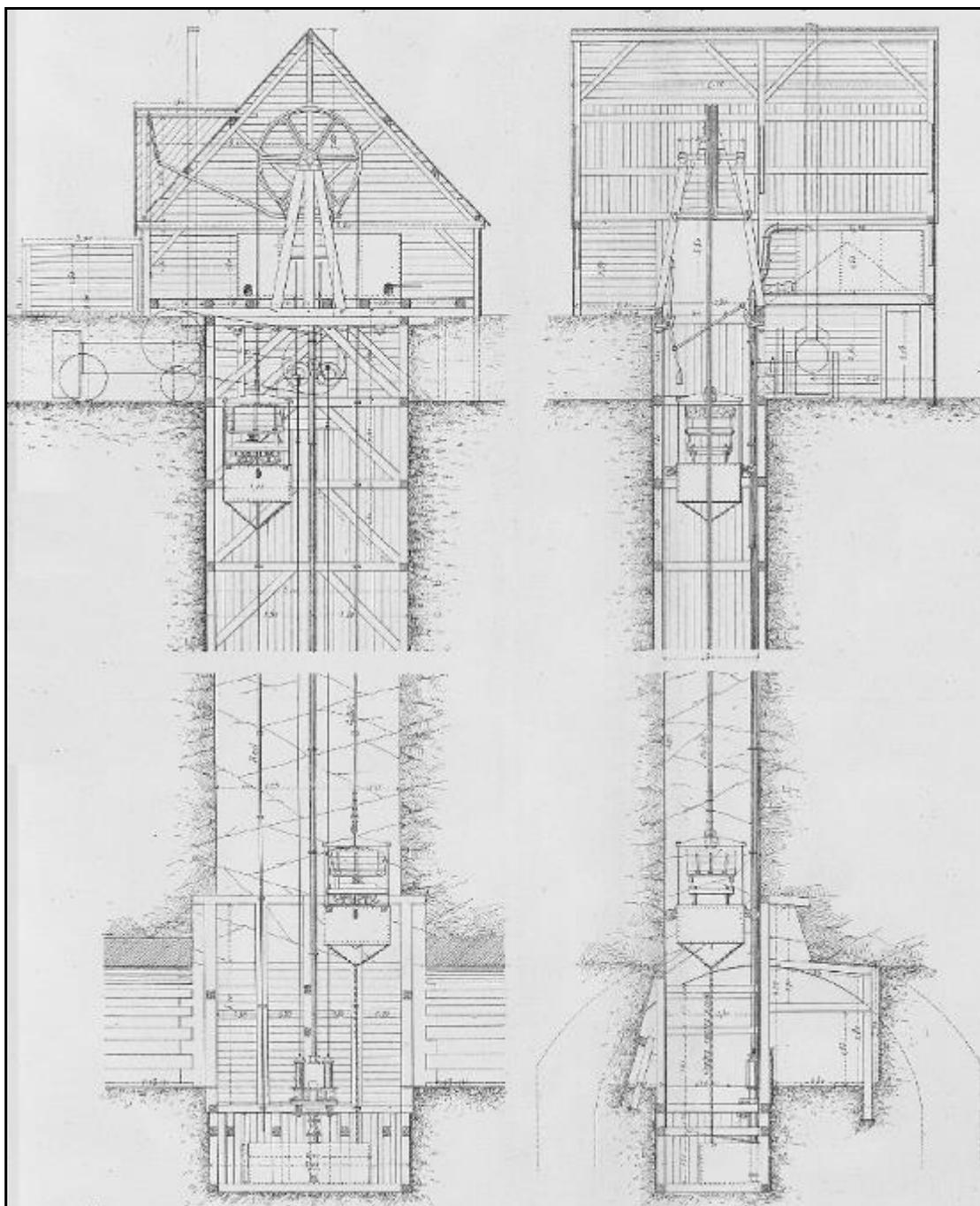


7

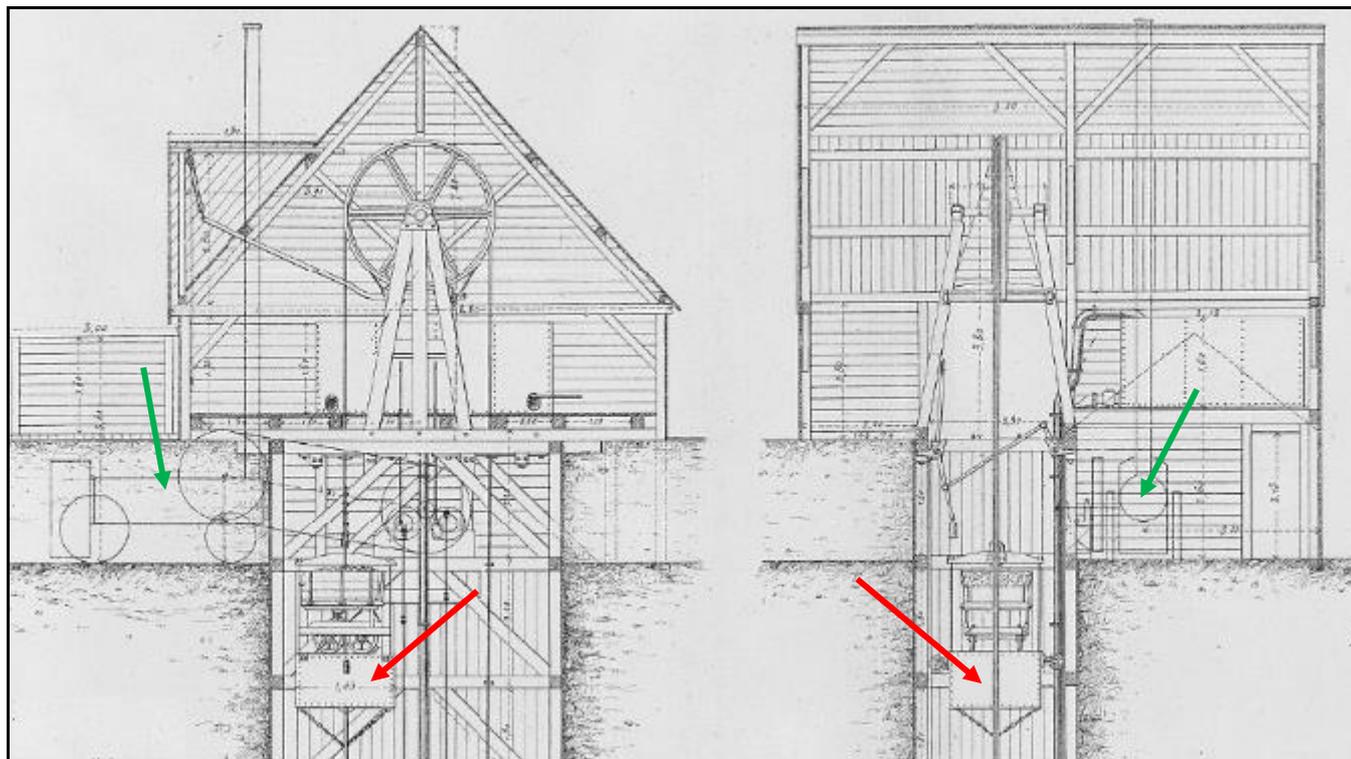


8

Ci-dessous à gauche, coupe du monte-charge perpendiculairement à la galerie et à droite, dans l'axe de la galerie



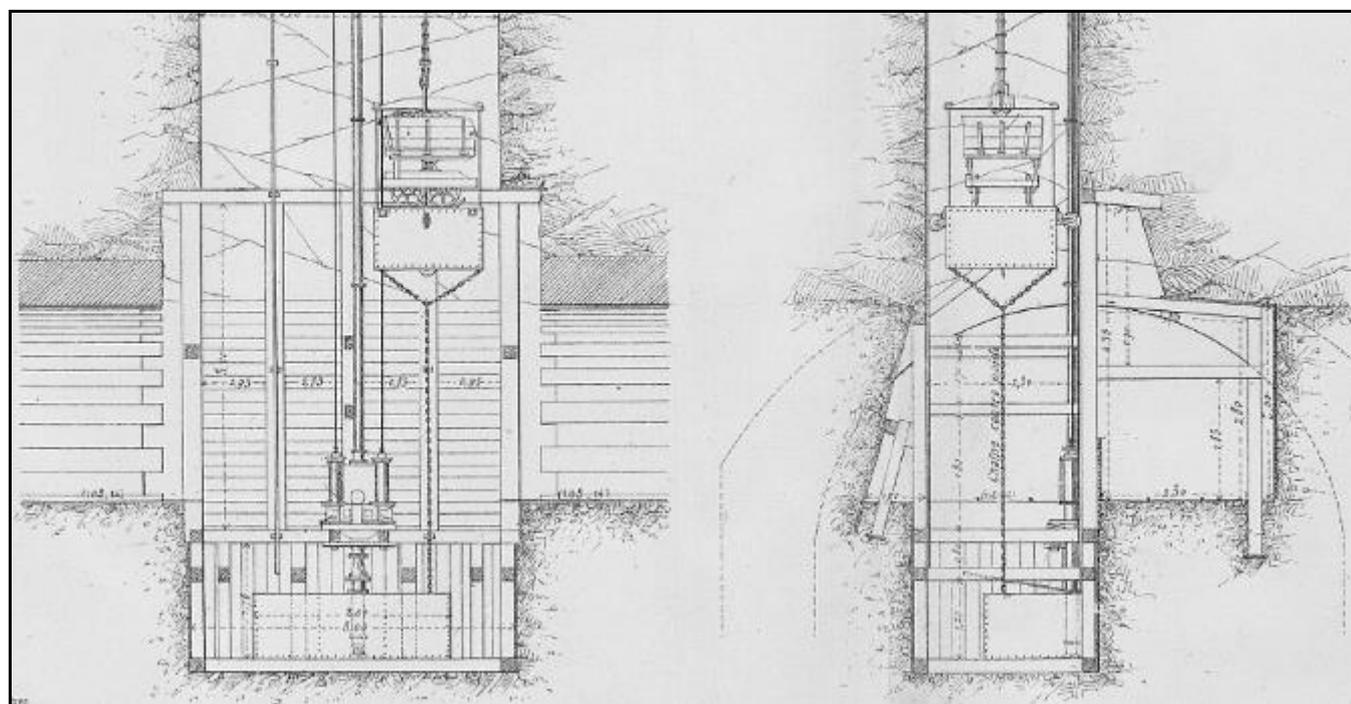
Le wagonnet chargé de déblais était remonté grâce au contre-poids constitué par le wagon descendant, chargé de matériaux et/ou à l'aide d'un caisson rempli d'eau. Un fois en bas, l'eau du caisson était pompée pour être remontée à la surface à l'aide d'une locomobile de 6 chevaux.



Ci-dessus, détail du monte-charge, en surface.

La flèche rouge pointe un caisson

La flèche verte pointe la locomobile



Ci-dessus, détail du monte-charge, au niveau de la galerie.

Dès 1866, des réparations s'imposent en raison d'un premier éboulement. Quatre ans plus tard, l'explosion de mines, lors de la guerre franco-prussienne de 1870-1871, provoque des éboulements sur 2 sections distinctes de 30 et 14 m de long, non loin de l'ancien puits d'extraction n°2. Reconstitué en 1873, le tunnel est affecté par un éboulement en 1875, à l'aplomb exact du puits d'aération F.

Le 1^{er} septembre 1914, le plancher d'une carrière souterraine, située de part et d'autre au-dessus du tunnel, fait l'objet d'un dynamitage par les troupes françaises en retraite devant les Allemands. Cette explosion crée une énorme cloche d'effondrement, de 17 m haut sur 50 m de longueur au-dessus des voies. Après la victoire de la Marne et le retrait des Allemands au nord de Soissons, et face à l'urgence de remettre la ligne en service pour ravitailler les armées françaises, il est décidé d'intégrer cette cavité à l'ouvrage par la construction d'une voûte rehaussée, soutenue par des arcades et des arcs boutants situés à hauteur de l'ancienne voûte primitive pour renforcer les nouveaux piédroits. Cette remise en état s'effectue entre février et mai 1915, et il est à noter que l'ancienne carrière souterraine, dont l'accès se faisait par un puits de surface abandonné, reste accessible par la cloche d'effondrement.



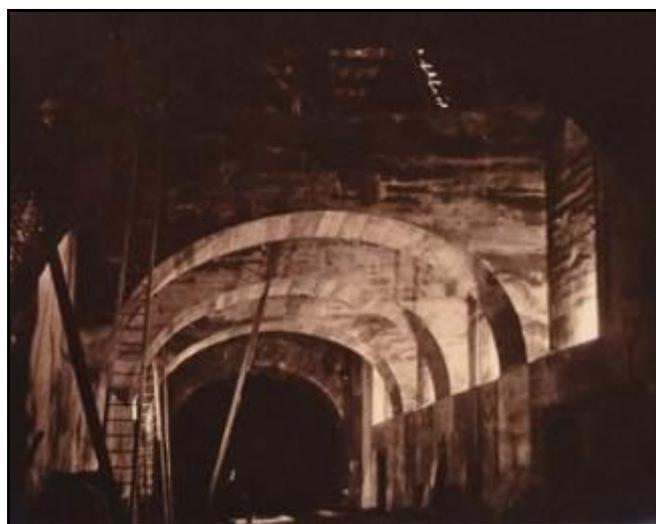
A gauche, construction des arcades de renfort alors que le tunnel, dans le bas de la photo, n'est pas encore dégagé



A droite, vue des voûtes étayées après dégagement du tunnel, visible en bas de la photo



Photo des arcades avec le tunnel dégagé dans le bas de la photo



Les arcs boutants qui assurent la rigidité des piédroits à mi-hauteur

En juillet 1918, un tronçon de 40 m est à nouveau détruit au voisinage de l'entrée, puis le 9 juin 1940, aux deux extrémités sud et nord du tunnel.



L'entrée du tunnel en septembre 1918, durant la réparation après la destruction de juillet

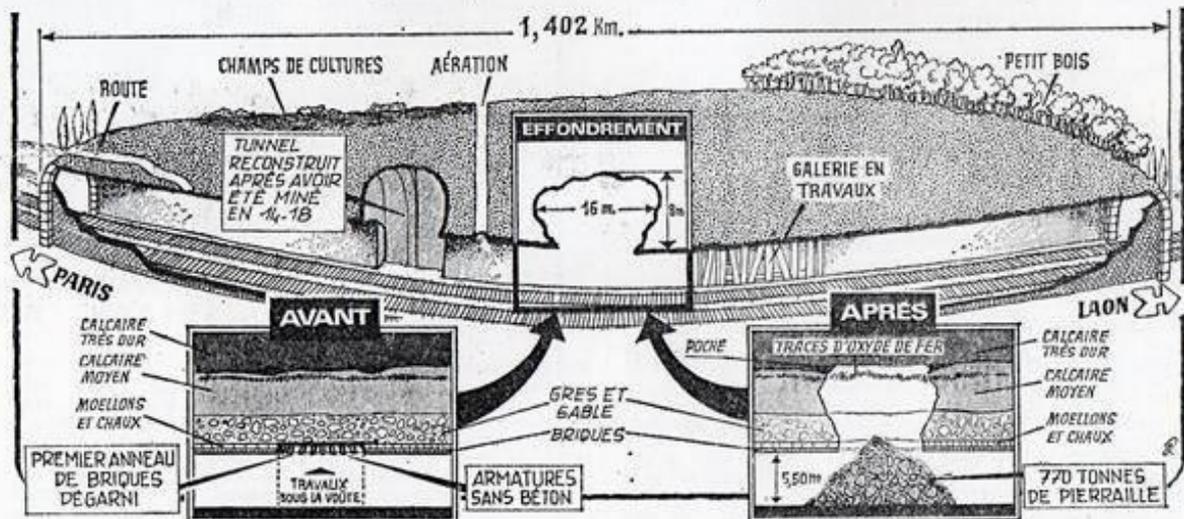


Le tunnel boisé et en cours de réparation après la destruction de juillet 1918

Enfin, le 16 juin 1972, le tunnel a été le théâtre de la catastrophe ferroviaire la plus meurtrière de France avec un bilan de 108 morts et 240 blessés dont 111 grièvement atteints. Selon la version officielle de l'époque, des briques s'étant détachées de la voûte de cette galerie de 110 ans d'âge, une campagne de réfection a été entreprise au printemps 1972. Selon un procédé courant, elle consistait à enlever une certaine épaisseur du parement en briques pour la remplacer par une coque en béton. Mais la différence d'avancement entre le chantier d'enlèvement des briques et celui de la projection du béton a fait qu'une partie de la voûte en attente de traitement aurait été affaiblie par les vibrations du passage des trains. Ainsi se serait-elle effondrée peu après le passage vers 20 h 20, d'une locomotive haut-le-pied.

VIERZY : DES BRIQUES ENLEVÉES DE LA VOUTE ONT DÉCLENCHÉ L'ÉBOULEMENT

C'est une des conclusions de l'enquête sur la catastrophe (108 morts en juin dernier)



Au lendemain de la catastrophe de Vierzy, « France-Soir » avait publié ce croquis en coupe du tunnel. D'après le rapport d'enquête, nos dessinateurs y ont ajouté un plan montrant l'état des travaux avant l'éboulement : c'est là que la voûte dégarnie de ses briques s'est effondrée. Les armatures non recouvertes de béton se sont révélées insuffisantes.

La cause officielle de l'effondrement

Quelques minutes plus tard, vers 20 h 50, l'autorail Laon > Paris, de type Caravelle et composé de 6 voitures, s'engouffre dans le tunnel à pleine vitesse. Il vient percuter l'éboulis ainsi formé par son côté nord, l'escalade et s'encastre dans la cloche d'effondrement formée dans la voûte. Et quelques instants plus tard, un deuxième autorail de même type, composé de 2 voitures et venant en sens inverse depuis Paris fait exactement la même chose sur le côté sud de l'effondrement. Ce faisant, les deux voitures de tête de ces deux autorails sont littéralement broyées et imbriquées l'une dans l'autre.

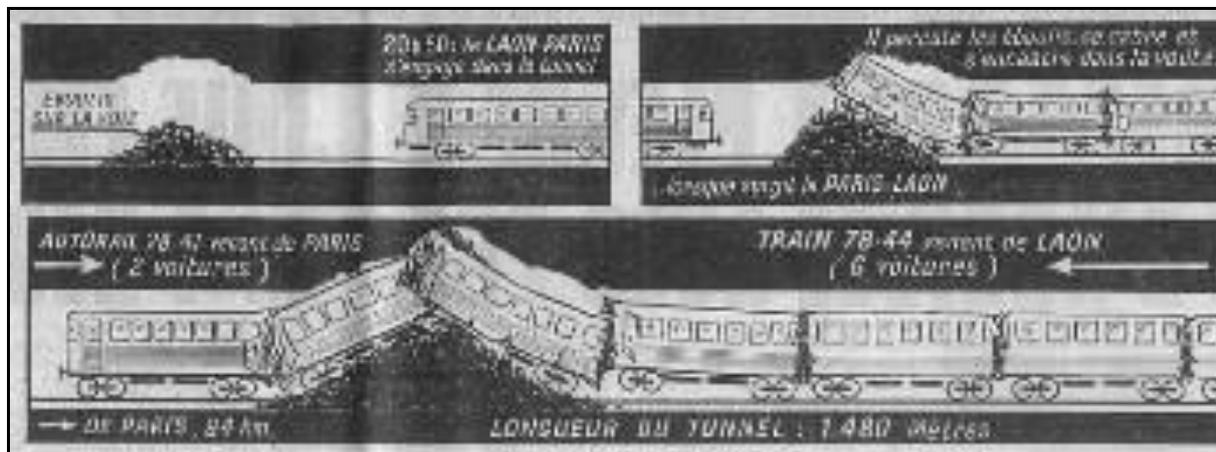


Schéma d'époque montrant le principe de la catastrophe



Ci-dessus et ci-dessous, le spectacle atroce que vont découvrir les premiers sauveteurs



Un des sauveteurs au travail.

Ci-contre, cette terrible photo témoigne très clairement des difficultés du sauvetage des victimes coincées dans les ferrailles tordues

Le travail de sauvetage sera en effet très difficile en raison de la crainte de nouveaux effondrements, de l'exiguïté de l'espace et de l'impossibilité d'utiliser des chalumeaux pour découper les tôles.

Les deux derniers survivants n'ont été extraits que 40 heures après l'accident et l'un est par la suite décédé de ses blessures. Le corps de l'un des conducteurs n'a pu être retiré que 5 jours après l'accident.



La photo de gauche ci-dessous laisse clairement voir la cloche d'effondrement de la voûte



Vue générale du lieu de l'accident
 Au premier plan, au-dessus de l'autorail,
 la cloche résultant du dynamitage de la première guerre mondiale
 Au fond, 20 mètres plus loin, l'effondrement et le train encastré dans la voûte



Ci-dessus et ci-dessous :
Très vite apparaît la nécessité d'étayer la voûte pour éviter un nouvel effondrement





Ces deux photos montrent l'exacte dimension du chaos et de la cloche d'effondrement



Ci-dessus et ci-dessous, l'état du matériel après extraction du tunnel montre bien la violence du choc

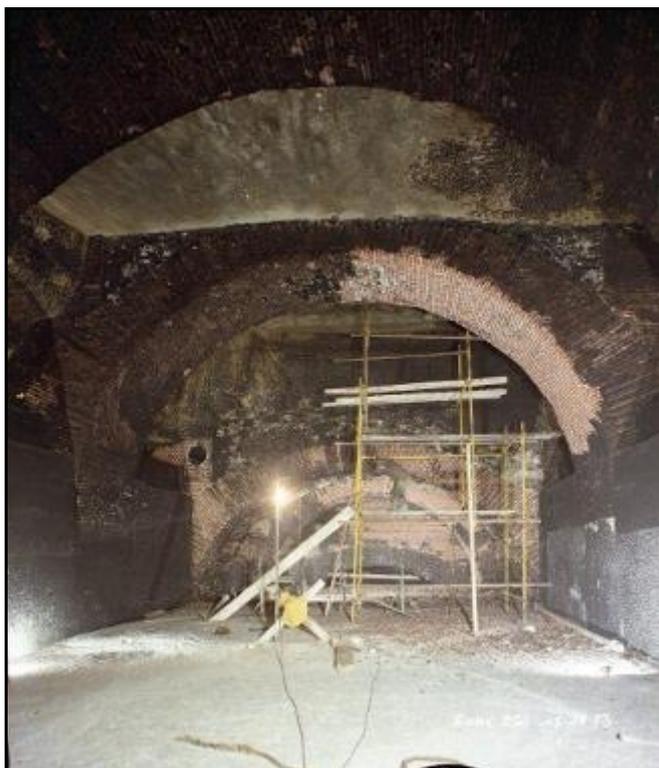


Cette catastrophe fera par la suite deux autres victimes induites : deux ingénieurs à l'infrastructure incriminés lors du procès et qui se suicideront dans les années suivantes, n'ayant pu supporter les accusations dont ils étaient victimes.

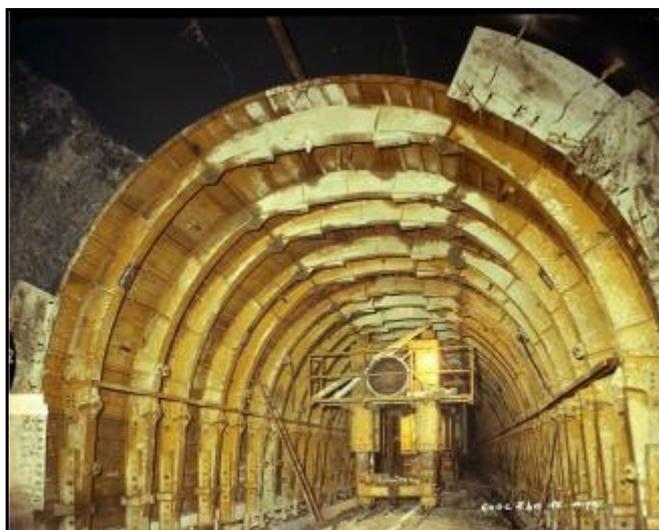
En effet, un regard plus moderne sur cette catastrophe, s'appuyant sur des constats effectués depuis sur des tunnels abandonnés et effondrés faute d'entretien, chose qui n'existait pas en 1972, montre que ce n'est pas le parement de voûte qui a lâché, mais le terrain sus-jacent. Ce qui laisse supposer que l'explosion de 1914 a créé autour d'elle un jeu de fissures indécélables (selon les moyens de l'époque) qui se sont développées à bas bruit et auraient affaibli le terrain jusqu'à provoquer sa rupture sous la vibration des trains. Les ingénieurs ne pouvaient donc être en cause.

Après réfection complète, le tunnel de Vierzy sera mis en voie unique ainsi que tous les tunnels de ce type construits dans le nord et l'est de la France.

Ci-dessous, différentes vues de la réfection du tunnel, réalisée en 1973



On peut apercevoir à gauche, les arcades de la cloche créée à la suite du dynamitage de 1914



ICONOGRAPHIE :

ENTREE



SORTIE

Ci-contre, l'entrée du tunnel avant la catastrophe

Ci-dessous, on aperçoit nettement la réduction de gabarit qui aura pour conséquence, la mise à voie unique à l'intérieur du tunnel



A noter ci-contre, la casemate construite à la sortie du tunnel, sans doute par les Allemands durant la Seconde Guerre mondiale

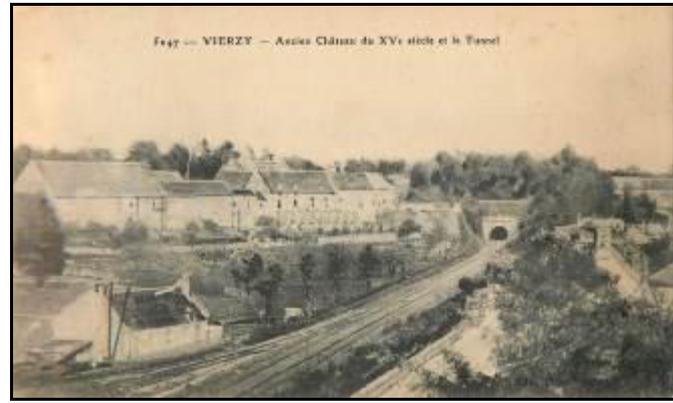




Sur la photo ci-dessus, on devine le monument commémoratif

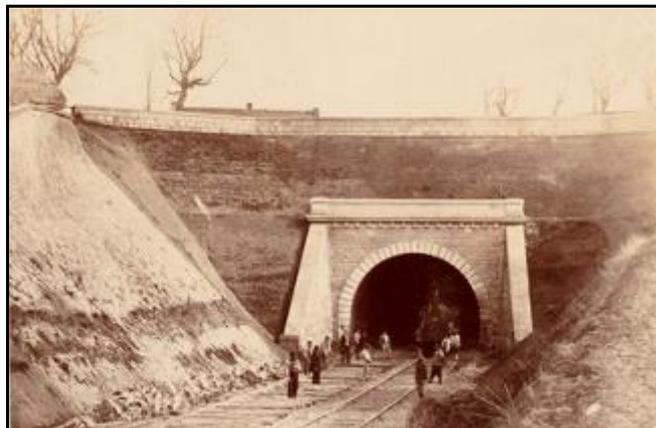


Ci-contre et ci-après, l'entrée du tunnel aujourd'hui et hier, avec à gauche, l'ancien Tournoi.



Ci-contre, l'ancien Tournoi, édifié au XV^e siècle



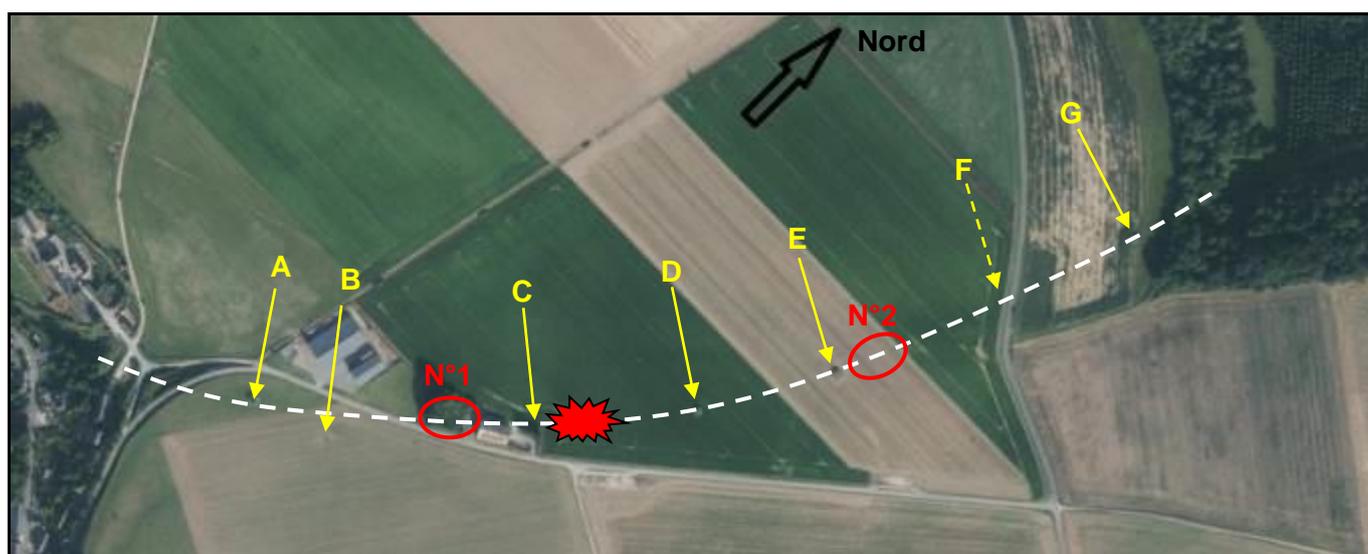


Autres vues anciennes de l'entrée du tunnel



L'une des 6 cheminées du tunnel de Vierzy

Elle est entourée d'un mur de protection en béton armé car elle a été, comme 4 autres, « bunkérisée » par les Allemands, pendant la seconde guerre mondiale, pour la protéger des bombardements aériens



Ci-dessus, l'emplacement des 7 puits d'aération (flèches jaunes)

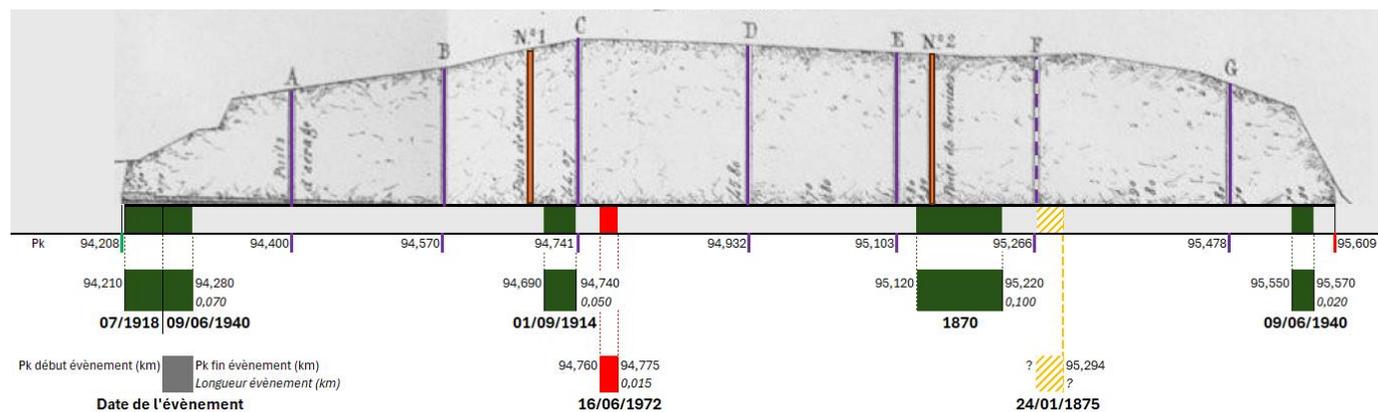
Le puits B, déporté par rapport à l'axe du tunnel, est le seul qui n'est pas bunkerisée

Le puits F n'existe plus, vraisemblablement comblé depuis l'éboulement de 1875.

Les ovales rouges localisent les puits d'extraction, comblés après l'achèvement du tunnel

Le dynamitage de 1914 et l'effondrement de 1972 ont eu lieu à environ 550 m de l'entrée du tunnel, à proximité de l'ancien puits d'extraction n°1 et du puits d'aération C.

Pour finir, les différents évènements qui ont émaillé la vie très mouvementée du tunnel de Vierzy peuvent se résumer selon le schéma suivant :



En vert : les destructions par faits de guerre
 En jaune orange : l'éboulement de 1875
 En rouge : l'éboulement et la catastrophe de 1972
 En violet : les puits d'aération
 En orange : les puits d'extraction

En outre, le lecteur trouvera ci-après deux documents officiels :

- L'un relatif à l'effondrement du tunnel et à la catastrophe.
- L'autre à une analyse du vieillissement et de l'altération des roches calcaires et du parement de la voûte.

Si cette fiche comporte des erreurs ou des oublis, merci de nous le signaler.

★ ★ ★

L'effondrement du tunnel de chemin de fer de Vierzy

P. HABIB

Ancien Président
du Comité français
de mécanique des roches
Conseiller scientifique
du LMS
(École polytechnique-
École des mines de Paris)
LMS
École polytechnique
91128 Palaiseau Cedex

Résumé

Le tunnel du chemin de fer de Vierzy s'est effondré en juin 1972 pendant des travaux d'entretien après une très longue période de service marquée par des réparations liées à l'ancienneté et à des destructions militaires.

Mots-clés : tunnel de chemin de fer, effondrement.

The collapse of the Vierzy railway tunnel

Abstract

After a very long time since the tunnelling of the Vierzy railway tunnel it collapsed all of a sudden.

Key words: railway tunnel, collapse.

A l'encontre des cas cités au cours cette réunion, l'effondrement du tunnel de Vierzy le 16 juin 1972 n'a pas apporté grand-chose à la mécanique des roches, si ce n'est de confirmer que la rupture des roches peut se produire après de très long temps, comme cela a eu lieu dans certains stots des mines de fer de Lorraine ou lors de l'effondrement de Clamart. Cependant, comme cette catastrophe a fait une centaine de morts on ne peut pas négliger d'en parler.

Le tunnel de Vierzy a une longueur de 1 394 m ; il avait été construit dix ans avant la guerre de 1870, sous un recouvrement de 40 m. Sa réalisation avait été faite dans des conditions tout à fait favorables, dans les sables de Cuise directement sous les calcaires grossiers de la région parisienne. On ne pouvait pas rêver mieux. Il n'y avait pas d'eau ou très peu, et localement ; le toit tenait plutôt bien ; il était soutenu par des parements en bonne maçonnerie de blocs de calcaire grossier prélevés et taillés en carrière, mais probablement sans attendre la dessiccation des pierres à l'air, ce qui, comme on le sait, renforce la résistance des calcaires, même si la pierre est ensuite ré-humidifiée. Évidemment les propriétés du toit calcaire pouvaient varier d'un point à un autre car la base des Calcaires Grossiers c'est le Lutétien qui n'est pas aussi bon que le Banc royal...

Malheureusement, le site de ce tunnel était vraiment très mal placé : au cours des guerres de 1870, de 1914-1918, de 1939-1945, toutes les armées en retraite qui passaient par là ont saboté le tunnel en partant, de façon à entraver la marche de leurs adversaires. Au moins quatre fois ; ce qui évidemment n'a pas été très bon pour la santé de l'ouvrage...

Vers 1930, certains parements avaient montré en hiver des signes de fatigue, avec des dégradations en surface, voire de l'écaillage de la maçonnerie, et à partir de cette alerte on a diagnostiqué une gélivité de la pierre. Cette hypothèse était vraisemblable car la région de Villers-Cotterêts jusqu'à Soissons et même vers Reims peut être très froide en hiver, avec des températures jusqu'à -15 °C. Il fut donc décidé de remplacer le soutènement par des panneaux préfabriqués de briques. La situation ainsi améliorée a été surveillée et a montré à nouveau, après quelques dizaines d'années, des dégradations superficielles des briques que l'on a alors sans doute considérées elles aussi comme probablement gélives. La SNCF décida alors un traitement plus lourd sur 71 m de longueur avec un décaissage des revêtements par courtes longueurs, la mise en place d'un treillis soudé puis d'un béton projeté de sept centimètres d'épaisseur, les creux de la voûte après démolition du mortier de liaison ayant été garnis de béton venant en surépaisseur : cette remise en état était donc beaucoup plus importante et plus efficace que l'intervention précédente.

Alors là, trois malchances se produisent. D'abord le compresseur, nécessaire pour la projection du béton, tombe en panne le 5 avril. Pour ne pas retarder les travaux, il est alors décidé de les reprendre par le nord, c'est-à-dire par l'autre bout de la rénovation de 71 m toujours par longueurs courtes de 7 m et en revenant vers ce qui avait déjà été fait, c'est-à-dire les 6 m déjà découverts. Les travaux sont presque terminés et le soir du dernier jour, les derniers 6 m ayant été décaissés, la journée de travail étant finie sans problème apparent, tout le monde quitte le chantier et le tunnel. Ultérieurement, une locomotive isolée passe dans le tunnel. Ultérieurement encore, après un délai non identifié, le

tunnel s'effondre et c'est là la deuxième malchance : car si le travail n'avait pas été abandonné il est probable que les travailleurs se seraient rendu compte de l'imminence de l'effondrement ; ils auraient alors pu prendre, peut-être, quelques précautions, mais surtout faire prévenir les trains que la voie n'était plus libre. De plus si les ouvriers en partant n'avaient pas encore quitté le tunnel, ils auraient probablement entendu le vacarme de l'effondrement. Et que dire du passage de la locomotive isolée ? À partir de ce moment, il n'y avait plus personne dans le tunnel, mais un énorme tas de pierres au milieu des voies et au-dessus une grande cloche d'effondrement à la place du toit. La longueur de l'éboulement était de 14 mètres.

Puis vient l'autorail de Paris vers Soissons, à 108 km/h ; à 20 h 55 la motrice monte sur le tas de pierres et va s'encastrer dans la cloche du toit.

Puis vient l'autorail de Soissons vers Paris, à 90 km/h, qui s'écrase à son tour à 20 h 56 sur le tas de pierres. Dans les deux cas, aucune trace de freinage n'a été trouvée.

On imagine alors l'horreur du drame, dans l'obscurité, avec les cris des blessés sans secours, ou des secours qui ne pourront parvenir qu'au bout d'un temps très long...

En fait, une dalle de calcaire du Lutétien à l'emplacement de l'effondrement s'était détachée de la base des calcaires grossiers et s'appuyait sur le tunnel. Celui-ci avait commencé à « souffrir » d'une très lente rupture différée qui s'était manifestée par des dégradations sur des parements, qu'ils soient en pierres ou en briques. Et, voilà la troisième malchance : c'est le fait que la panne de compresseur se soit produite justement en ce lieu très particulier où une dalle calcaire s'était décollée, où un joint de stratification s'était ouvert au-dessus d'elle déjà depuis un temps très long et où cette dalle surchargeait le tunnel, d'où les désordres observés. Mais depuis quand ? Certainement depuis très longtemps, car dans le vide du décollement on a trouvé les traces noirâtres de la fumée des convois, c'est-à-dire des traces très anciennes, et d'ailleurs sans qu'on sache très bien par quelles fissures ces fumées avaient pu circuler dans ce joint. Les vibrations engendrées par le passage des trains ont donc eu le temps, bien avant la catastrophe, de secouer cet emplacement désormais très sensible.

La figure 1 représente le profil en long de la partie effondrée du tunnel de Vierzy avec le massif sur lequel les convois se sont brisés.

La figure 2 est une photographie de la brèche d'effondrement du côté de Soissons. On y voit nettement le banc de calcaire qui s'est plié pour « s'asseoir » sur la voûte du tunnel.

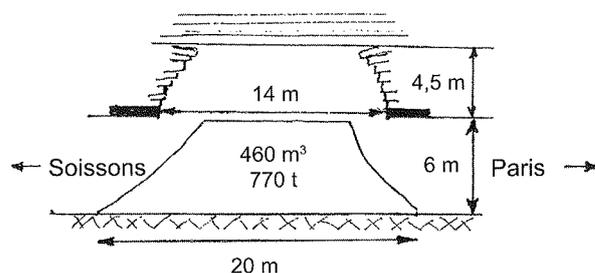


FIG. 1 Profil en long de l'effondrement du tunnel de Vierzy.

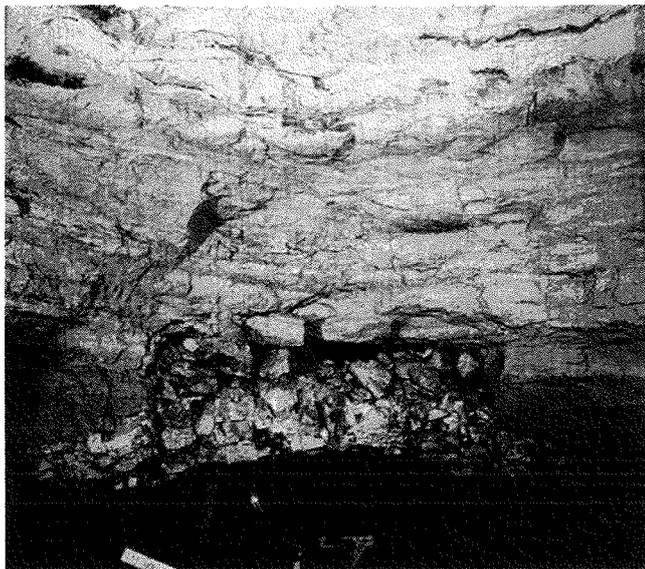


FIG. 2 Effondrement du tunnel côté Soissons.

La figure 3 est une photographie à 14 m au sud de la précédente qui représente la brèche d'effondrement du côté de Vierzy. On y voit distinctement le panneau de briques de la précédente réparation qui n'a pas encore été enlevé, ainsi que la galerie pilote au toit du tunnel, plus ou moins bien tassée et liée au Lutétien et surtout tout en haut, au plafond, la fissure au-dessus du banc décollé de la masse effondrée.

Décollement du banc

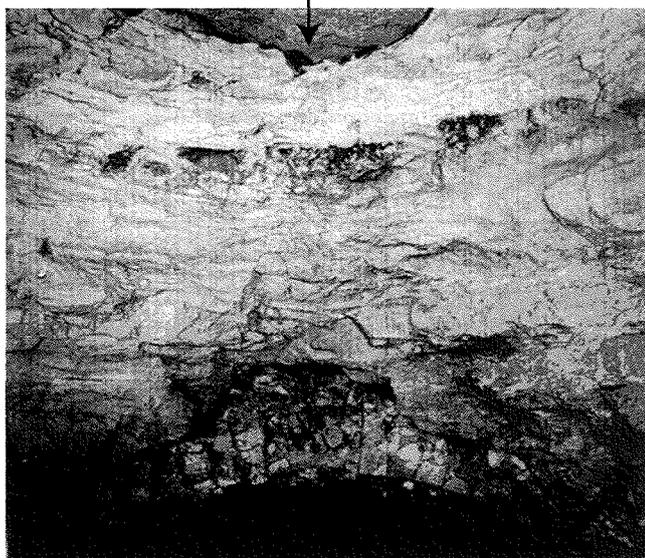


FIG. 3 Effondrement du tunnel côté Vierzy.

L'effondrement du tunnel de Vierzy a mis beaucoup de temps à se produire entre le moment d'un chargement excessif et la rupture franche. Mais quand a lieu le chargement excessif ? Probablement au cours d'un sabotage du tunnel. Mais quel sabotage puisqu'il y en a eu plusieurs ! L'écaillage observé en parement a été attribué à la gélivité des pierres calcaires, ce qui est à peine crédible car le tunnel, dès la construction, est apparu comme étant pratiquement sec, sauf localement. Quant à l'écaillage des rouleaux de briques, il peut difficilement être justifié par la gélivité des briques et apparaît davantage devoir être attribué à une contrainte tangentielle presque excessive qui s'achemine vers une rupture différée. Ce cheminement est un des sujets les plus difficiles de la Mécanique des Roches. L'effondrement différé de Vierzy peut être rapproché de celui de la carrière de craie de Clamart, Issy-les-Moulineaux, par la durée de son apparente stabilité.

Vers les années 30, Armand Mayer (qui fut bien plus tard à l'origine de la création du Comité français de mécanique des roches), ingénieur des Mines à l'Inspection générale des carrières de Paris, fut chargé d'expertiser cette carrière qui paraissait un peu douteuse. Il fit réaliser des essais de compression simple sur des éprouvettes de craie prélevées dans la carrière pour les comparer à la contrainte dans les piliers, calculée à partir du poids des terres et de la surface des sections droites des piliers de craie. En somme une mécanique des roches élémentaire. La résistance de la craie étant le double de la contrainte moyenne dans les piliers il trouva que ce coefficient de sécurité était trop petit et le terrain de surface fut déclaré inconstructible.

Après la guerre de 1939-1945, rien ne s'étant produit depuis vingt ans, la poussée démographique aidant, le terrain fut utilisé pour des constructions relativement légères par rapport au poids des terres. En 1961, l'effondrement de six hectares engendra de gros dégâts en surface avec des immeubles détruits, une vingtaine de décès et de nombreux blessés. Armand Mayer avait eu tort pendant trente ans. Mais il a eu raison après.

Le cas des falaises qui s'effondrent après de nombreuses années est moins significatif car les tempêtes, la température, la météo peuvent jouer. Mais le calme d'une carrière fermée est bien plus difficile à commenter et montre la difficulté de la prévision de la rupture différée.

Bibliographie

Rapport de l'enquête administrative du 11 mars 1973, présidée par J. Rérolle (J. Goguel, J. Kérisel, F. Ramel, L. Lupiac et P. Duffaut).
Publié au J.O. du 11 avril 1973, p. 53 à 72.

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.

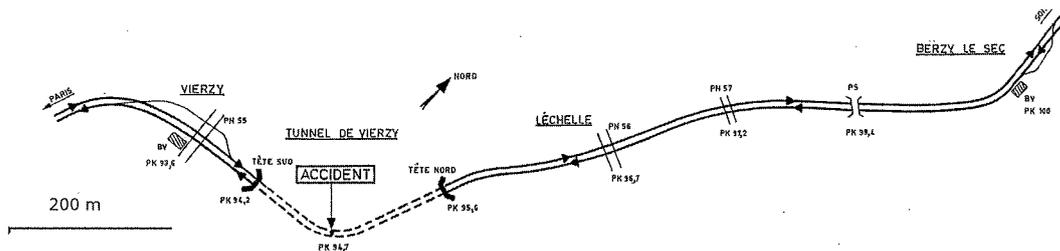


FIG. 1 Tracé en plan (Archives SNCF).
Horizontal alignment.

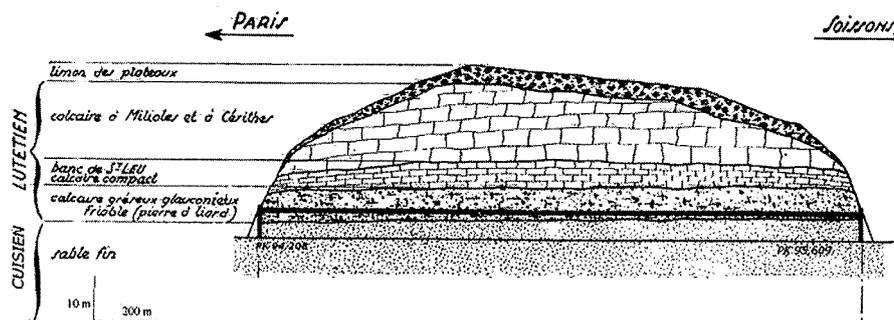
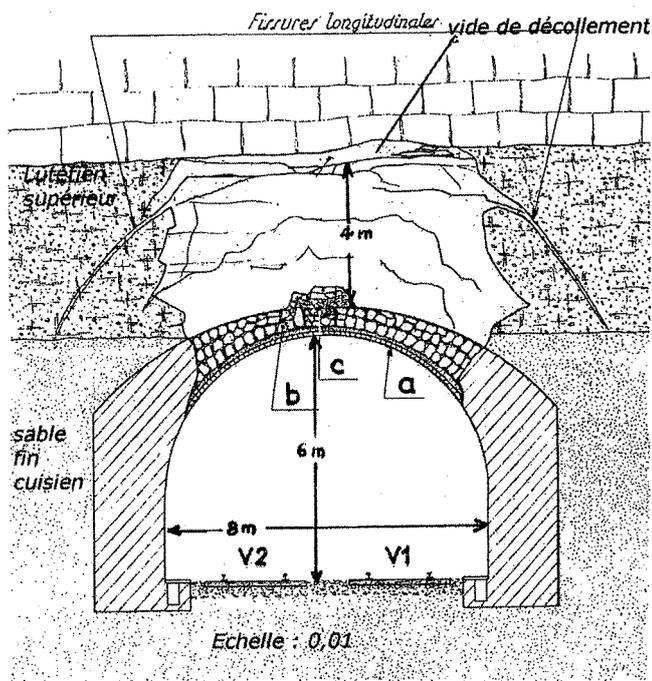


FIG. 2 Profil en long et coupe géologique simplifiée du projet (Archives SNCF).
Longitudinal profile and simplified geological cross section.



- 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 ».

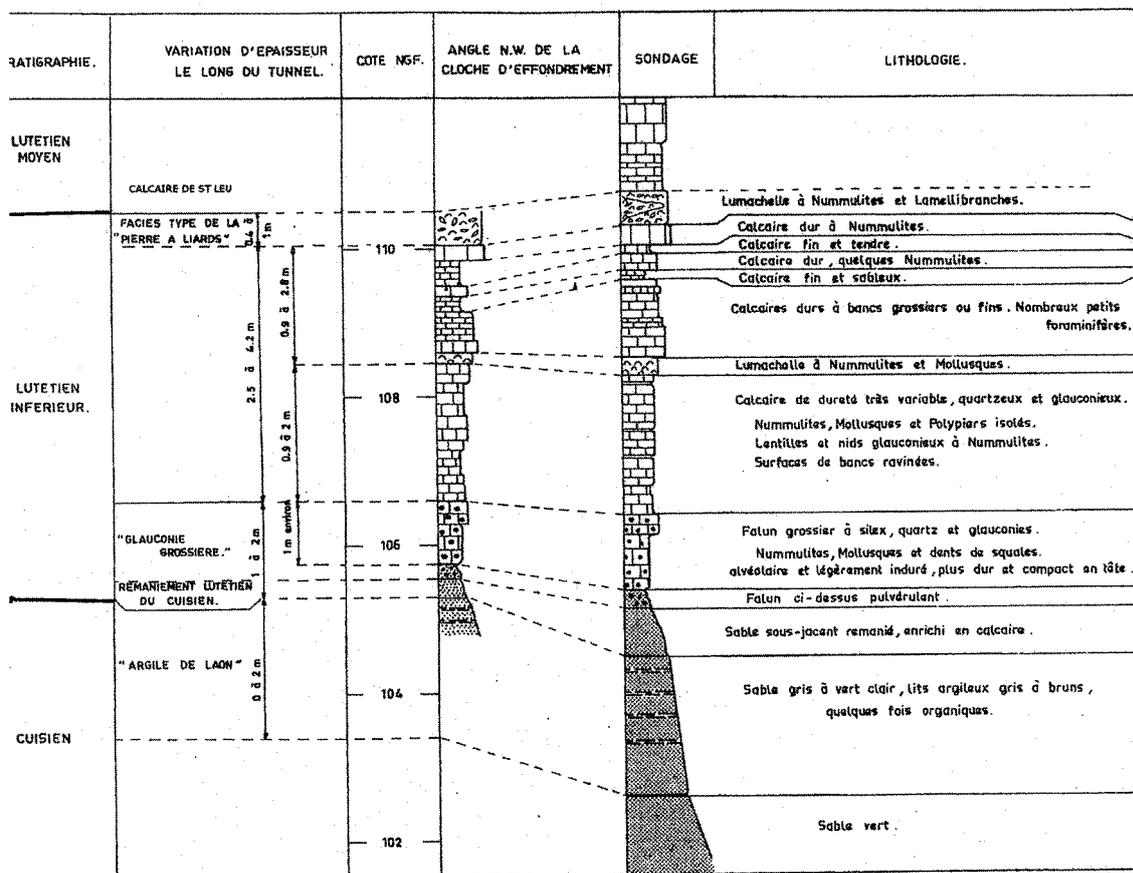


FIG. 4 Logs du Lutétien inférieur (d'après Pellerin, 1978).
Geological logs of lower Lutetian.

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 rubéfiations 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

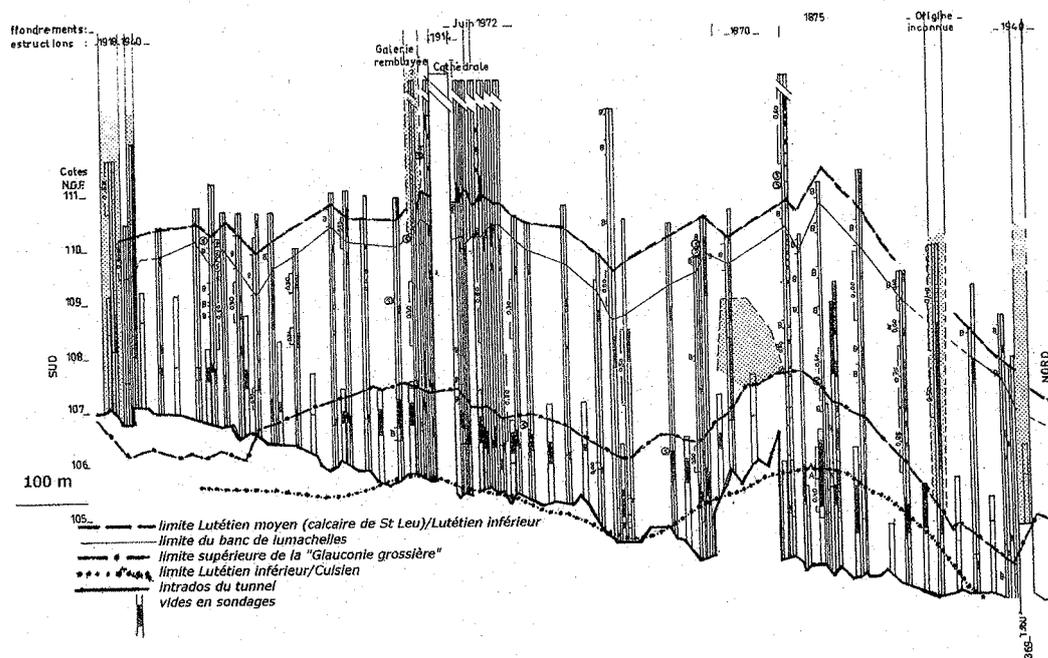


FIG. 5 Coupe géologique du tunnel et vides dans les sondages (d'après archives SNCF et Pellerin, 1978).

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. A 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. A 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 : gélification 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