ÉLECTRICITÉ

La “Direttissima” Bologne-Florence

Déjà de nombreuses publications (en particulier : Annali Dei Lavori Publici, Gen. 1934 et l'Ingegnere, 16 Agosto 1934), ont parues au sujet de cette nouvelle ligne électrifiée qui mérite d'être connue, car effectivement sa réalisation comporte un certain nombre d'ouvrages techniques, du plus haut intérêt ; aussi en donnerons-nous un résumé sur les généralités et surtout sur les difficultés techniques qui ont dues être surmontées.

Données générales

Déjà en 1852 lorsqu'on a voulu relier par la voie ferrée les deux versants des Appennins un projet fut présenté dont le tracé empruntait les vallées du Setta et du Bisenzio, par où passe actuellement la « Direttissima », mais il n'avait pas les caractéristiques actuelles et on lui a préféré celui de la « Porrettana » qui fut définitivement exécuté.

Mais cette ligne à voie unique, avec de fortes rampes et au tracé très mouvementé, qui ne permet pas aux convois des vitesses commerciales suffisamment élevées, s'est montrée dès ses débuts insuffisante pour l'important trafic qui s'impose entre la riche vallée du Pô, les villes industrielles qui s'y trouvent et les régions très peuplées de l'Italie du centre, qui en sont séparées par la difficile barrière de l'Appennin. En 1864 on comprit déjà la nécessité de créer une liaison plus directe et plus rapide entre Florence et Bologne.

De nombreux projets furent présentés depuis 1871, auxquels sont liés les noms des techniciens les plus illustres de l'époque : prof. Antonelli, ing. Antonio Zannoni, ing. Luigi Lugliano et d'autres. L'ing. Giovanni Protche, qui avait fait le projet de la « Porrettana » et en avait dirigé les travaux, fit une très belle étude en 1882 sur la nouvelle ligne. Son projet, qui fut présenté après sa mort par les ingénieurs Minarelli et Dallolio en 1887 a été suivi presque en entier pour la construction de cette nouvelle ligne : il suivait, en effet, la vallée du Setta avec des rampes inférieures à 12 ‰ jusqu'à une percée de l'Appennin à la Côte 328 et qui devait avoir 18.023 m. de long.

En 1902 le Gouvernement nommait une Commission spéciale, appelée à trancher définitivement la question et se servant des projets présentés. A la présidence de cette Commission fut nommé le sénateur ingénieur Giuseppe Colombo. Celle-ci écarta définitivement le projet de doubler la ligne existante la « Parrettana », et déclara le projet Protche le plus convenable aux exigences de la nouvelle ligne (fig. 1).

Par la loi du 12 Juillet 1908 n° 444, le Gouvernement autorisa la construction de la ligne établie par la Commission Colombo et vota un crédit de 180 millions de liras. Au mois d'Août de la même année fut institué à Bologne le Bureau d'étude de la construction de cette nouvelle artère et en Septembre on commença les relevés topographiques et les études géologiques, pour établir le projet définitif, d'après lequel on devait effectuer les travaux. Ce projet ne fut approuvé par le Conseil supérieur des Travaux publics que le 15 Février 1911 n° 112.

Les caractéristiques principales de la nouvelle lignes sont les suivantes :

a) Ligne à voie double sur tout son parcours.

b) Abolition des passages à niveau.

c) Pentes inférieures à 12 ‰ dans la partie ordinaire et à 8 ‰ dans les tunnels (dans le grand tunnel de l'Appennin la pente maximum est de 5,77 ‰).

d) Rayons de courbures supérieures à 800 m. dans la partie Bologna-Castiglione dei Popoli et à 600 m. pour le reste du tracé.

e) Gares intermédiaires capables d'abriter de longs convois et munies de voies de garage supérieures à 500 m.

f) Armement au moyen de rails : pour la voie normale, type F.S.P. 50,6 de 18 m. de long sur 30 appuis ; type F.S.P. 46,3 de même longueur avec 26 appuis pour les voies de garage.

g) Electrification sur tout le parcours.

D'autre part, afin de rendre moins sensible le passage des véhicules des parties rectilignes aux courbes, on a inséré même pour les courbes à rayon supérieur à 1.000 m. des raccords paraboliques ainsi que des raccords altimétriques entre les divers tronçons de la ligne.

La vitesse maximum consentie sur la nouvelle ligne est de 120 km./h. pour le versant bolognais et de 100 km./h. pour celui toscan.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES	Ligne Direttis. Bologna-Firenze	Ligne Bologna Pistoia-Firenze	Ligne Bologna Faenza-Firenze	
<i>Système d'exploitation..</i>	<i>électrique</i>	<i>électrique</i>	<i>à vapeur</i>	
Longueur réelle km.	96+907,98	131+834,33	150+349,60	
Long. virtuelle moyenne. km.	124+500,000	219+500,00	250+000,00	
Longueur du parcours à voie simple..... km.	0	109+182,75	100+948,60	
Longueur du parcours à voie double..... km.	96+907,98	22+651,58	49+401,00	
Longueur du parcours en tunnels..... km.	36+805,95	18+475,31	23+743,94	
Rayon de courbure minim. m.	600	300	300	
Pente maximum {	en voie normale ‰	12	26,15	23
	dans les tunnels ‰	8	25,27	24,99
	dans les gares.. ‰	2,5	26,00	3,00
Cote de percée de l'Appen- nin m.	322,46	615,92	330,91 578,38	
Rails..... type	F.S.P. 50,6	R.A. 36 S	R.A. 36 S	

Le tableau ci-dessus donne les principales caractéristiques de la « Direttissima » comparées à celles des lignes préexistantes la « Porrettana » et la « Faentina » d'où l'on peut facilement se rendre compte des modifications profondes qu'est appelée à apporter la « Direttissima » dans le trafic des réseaux

ferroviaires italiens. Les deux lignes sus-nommées subsisteront pour les services locaux et éventuellement pour décongeler la « Direttissima », en cas d'un mouvement exceptionnel.

La partie la plus importante des ouvrages d'art dans la nouvelle ligne est certes représentée par la percée de l'Appennin. Les difficultés rencontrées dans les ouvrages semblables réalisés dans cette chaîne de montagnes ont fait prévoir que les difficultés à vaincre seraient nombreuses et sérieuses et l'avancement lent, ce qui a fait décider le Bureau d'étude de Bologne d'attaquer la construction du tunnel, non seulement par les deux extrémités, mais aussi vers son milieu, au moyen de deux puits inclinés se trouvant à 123 m. 71 l'un de l'autre, près de la localité de Cà di Landino : on constituait ainsi quatre chantiers de travail.

Pour l'organisation des divers chantiers et pour le transport des matériaux nécessaires, on a prévu que l'utilisation des routes nationales ou départementales, avec les moyens de transport adéquats ne convenait pas, car cela aurait élevé notablement le prix de ces matériaux. On a donc décidé de construire des voies ferrées à voie étroite 0 m. 950 et pour les deux puits de Cà di Landino un téléphérique.

C'est en 1913 que les travaux furent effectivement commencés : mais bien peu en fut fait, car la Grande Guerre éclata. En 1919, les travaux furent repris et c'est en 1920 que l'on s'attaqua à la grande muraille des Appennins, mais avec peu de succès à cause des changements continuels de Gouvernement et des désordres dans le pays.

Depuis les débuts des travaux jusqu'au 28 Octobre 1932 la somme fournie par l'Etat pour la construction de la « Direttissima » s'éleva à 138 millions de livres.

Après l'événement du Facisme les travaux furent repris sans interruption et aussi activement que possible. En 1923, plusieurs maisons de constructions furent invitées à faire leurs offres, mais la meilleure dépassait de 30 % les prix de base de la concession, et cela, avec la possibilité d'augmenter ces prix, si pendant la construction se vérifiaient des difficultés imprévues : irruption d'eau et de gaz. A la suite de ces conditions la Commission ministérielle décida que les travaux seraient continués sous la direction de l'Etat. Cette décision n'a pas été mal fondée, car tous calculs faits, la construction du grand tunnel a coûté à l'Etat environ 100 millions de moins que s'il l'avait concédé à d'autres entreprises privées.

Organisation des travaux

En 1920 les voies de service pour le transport des matériaux étaient complètement terminées dans les vallées du Setta et du Bisenzio dont les longueurs respectives étaient de 25,900 km. et de 21,600 km.

Ces voies étaient dotées de quatorze petites locomotives dont la puissance variait entre 200 et 400 CV. et de 216 wagonnets. Pendant les travaux on a transporté 2 600 000 tonnes de matériaux correspondant à 33.200.000 tonnes-kilomètres. Le prix du transport est revenu à 0,80 lire par tonne-kilomètre, y compris la quote part d'amortissement des dépenses d'acquisition et d'installation de la voie de service.

Ce prix de revient est bien inférieur à celui par transport sur route, qui a monté dans les périodes de grand développement des travaux en moyenne à 2,50 lire par tonne-kilomètre.

L'installation du téléphérique a été très intéressante, tant au point de vue technique que de celui des résultats obtenus.

La longueur en projection horizontale, qui s'étend de l'embouchure nord du tunnel aux chantiers des puits, est de 9 km. La

dénivellation entre les deux points extrêmes était de 262 m. L'écartement des 2 lignes de 2,50 m. La capacité moyenne de transport de 27.500 kgs. ; la charge unitaire utile de 400 kgs. Il y avait 70 wagonnets en service. La station motrice se trouvait à l'extrémité supérieure, une station de renvoi à l'extrémité inférieure, un dispositif intermédiaire de double tension, un autre de double ancrage et deux dispositifs intermédiaires de tension et d'ancrage.

Ce téléphérique aux caractéristiques susindiquées a transporté pendant les travaux 75.000 tonnes de matériaux, en moyenne de 90 à 186 tonnes par jour.

Le prix du transport a été d'environ 40 liras par tonne, il a été d'environ 10 liras moins cher que s'il avait été effectué par d'autres moyens et on a obtenu une rapidité de transport très appréciable.

Pour constituer les trois chantiers principaux de la percée des Appennins on a dû faire des travaux de consolidation du terrain et régulariser le cours du Setta qui au printemps provoquait des inondations désastreuses. Pour assurer une existence aussi facile que possible aux ouvriers et à leurs familles on a construit de véritables villages munis du tout à l'égout, de l'eau potable et de l'éclairage électrique. Les installations sanitaires n'ont pas été négligées. Chaque chantier avait un poste de secours doté d'un laboratoire d'étude avec table d'opération et de tous les moyens de recherches bactériologiques.

Dans les deux petits hôpitaux stables, l'activité des médecins pour combattre la maladie des mineurs, a été couronnée d'un véritable succès.

Ce terrible microbe l'anchilostomiase, qui avait causé la mort à 10.000 ouvriers pendant les travaux de percement du Gothard, avait déjà envahi les chantiers des Appennins et avait commencé à produire un sérieux affaiblissement des masses ouvrières par anémie. Malgré les conditions favorables à sa propagation, grâce à l'humidité des lieux et à la température élevée dans les tunnels, la lutte contre l'anchilostomiase, menée avec la plus grande énergie, a permis le développement normal des travaux sans avoir à déplorer aucun cas mortel chez les mineurs et dans leurs familles.

Construction de l'ouvrage principal la " Grande galleria "

La construction du grand tunnel qui traverse les Appennins peut être considérée comme le plus important des ouvrages de ce genre, malgré qu'il soit un peu plus court que celui du Simplon, car les difficultés rencontrées ont été certainement beaucoup plus grandes. Le tunnel du Simplon est constitué par deux galeries à voie simple et la deuxième fut entreprise lorsque la première avait déjà été mise en service. Il fait partie des percées effectuées dans la roche d'origine très ancienne et on n'avait à lutter que contre la dureté de la roche, la température très élevée et les irruptions d'eaux chaudes. Dans les Appennins, à cause des masses argileuses et du terrain peu compact, le travail fut beaucoup plus rude et les surprises plus désagréables. Les ouvrages de retenue pendant le percement ainsi que la maçonnerie définitive étaient destinés à retenir les énormes poussées du terrain instable aussi bien que pour la simple fonction de revêtement.

A ces difficultés, déjà très importantes, il faut ajouter celles qui dérivent des manifestations très fréquentes et en quantité notable de gaz inflammables, ainsi que d'abondantes infiltrations d'eau souvent sous une très forte pression, qui a atteint jusqu'à 13 atmosphères. On comprend facilement que cette

« Grande Galleria » avec ses 18.507,38 m. de long et les difficultés techniques rencontrées tiennent la première place parmi toutes celles à voie double qui aient été construites dans le monde entier. Nous donnons un tableau comparatif dont les chiffres sont assez éloquentes.

Avant d'entreprendre les travaux de percement il était nécessaire de vérifier par des sondages les études géologiques préalables, pour connaître aussi exactement que possible l'allure des formations argileuses qui se trouvent en très grandes quantités dans la chaîne des Appennins et qui doivent leur origine aux puissantes actions mécaniques subies pendant les mouvements géologiques, d'où provient la chaîne elle-même.

En 1911 et 1912 on a effectué sept sondages dans la direction de l'axe du tunnel, suivant des profondeurs qui variaient de 135 à 386 m. En 1924 on en a effectué un près de la localité de Lagora de 420 m. qui a été ainsi poussée à 71 m. au dessus du niveau du tunnel. Les résultats expérimentaux ont entièrement confirmés les prévisions des géologues des Chemins de fer de l'État, ce qui leur a permis d'établir un profil géologique exact et de prévoir la nature des différents terrains qui seront rencontrés pendant les travaux.

Comme il a été dit, pour pouvoir accélérer l'avancement des travaux vers le milieu du tracé de la « Grande Galleria », on construisit deux puits inclinés, dont les travaux ont commencé en 1921 ; c'est ainsi qu'on a produit quatre points d'attaque.

C'est à l'emplacement où ces deux puits atteignent le tunnel que se trouve la gare à l'intérieur de celui-ci avec les voies de garage pour laisser la voie libre aux trains rapides de la « direttissima ».

L'inclinaison de ces deux puits est respectivement 0,516796 et 0,53401 et la différence d'altitude entre le plan supérieur et le niveau du tunnel est de 267 m.

La section des puits est établie de façon à permettre la libre circulation des wagonnets et l'emplacement des conduites pour la ventilation et l'air sous pression.

Pour la construction on a dû extraire 31.461 m³ de matériaux et effectuer 11.609 m³ de maçonnerie. On a dépensé pendant la construction 293.848 CV. h. d'énergie thermique et 1.543.632 kWh. d'énergie thermoélectrique produite par des moteurs Diesel. On a employé 13.942 kg. d'explosifs.

Les Appennins à l'endroit où il est traversé sont d'un accès facile puisque le point le plus élevé se trouve à 840 m. au dessus du niveau de la mer. Le relevé topographique a été relativement facile sans faire intervenir la méthode de triangulation ; il suffit d'ériger quelques tours d'observation d'une quinzaine de mètres. Ce relevé topographique dûment corrigé par des calculs appropriés a donné des résultats très satisfaisants, car à la rencontre des équipes sur le versant bolognais, les vérifications faites au théodolite n'ont enregistré qu'une différence de 21 ‰ et pour le côté toscan 13 ‰. Quant aux différences altimétriques elles n'ont pas été beaucoup plus grandes : 15 ‰ pour le côté toscan et 8,2 pour celui bolognais.

Les installations thermiques et thermoélectriques définitivement employées pour les besoins des chantiers relatifs à la « Grande Galleria » étaient constitués par 11 groupes de moteurs Diesel-génératrice triphasée dont la puissance variait de 120 à 400 CV. La puissance totale était de 2540 CV.

D'autre part, on a fait usage de l'énergie électrique fournie par une ligne spécialement aménagée, d'une longueur de 45,5 km

Données et caractéristiques techniques des plus grands tunnels transalpins comparées à celles de la « Grande galleria » des Appennins.

NOM DU TUNNEL	Ligne ferroviaire desservie	Longueur en mètres	A voie double ou simple	ALLURE		Cote de percée (en mètres au niveau de la mer)	DATES RELATIVES		Avancement moyen mensuel des travaux (en mètres)	Prix de revient par mètre courant (en liras)
				planimétrique	altimétrique		Au début des travaux	A l'achèvement des travaux		
FRÉJUS	Torino-Modane	13.635	double	rectiligne	Côté France { 0,5 ‰ 1 ‰ Côté Italie { 22,9 ‰ 27,5 ‰	1.295	Octobre 1857	26-12-1870	150	5.500
St-GOTHARD	Chiasso-Lucerne	14.920	double	rectiligne	De l'embouchure Nord en rampe de 5,82 ‰ pour la moitié du parcours pris en tronçon d'inclinaison entre 0,5 ‰ et 2 ‰.	1.155	Côté nord 4-6-1871 Côté sud 1-8-1871	28-10-1880	210	4.500
ARLBERG	Innsbruck-Berne	10.280	double	rectiligne	15 ‰	1.310	14-6-1880	19-11-1883	326	4.864
SIMPLON	Domodossola-Brigue	19.802	deux voies simples	rectiligne (embouchures avec rayon de courbure de 400 m.)	Côté Suisse 2 ‰ Côté Italie 7 ‰	705	15-8-1898	24-2-1905	247 pour chaque tunnel	5.000
LOETSCHBERG	Brigue-Berne	14.536	double	parties rectilignes intercalées dans trois courbes de 2 km.	Côté N.-O. 2 ‰ Côté S.-E. 3,8 ‰	1.246	15-4-1906	31-3-1911	373	3.500
GRANDE GALLERIA DES APPENNINS	Bologna-Firenze	18.507	double	rectiligne	Rampe de 1 ‰ pendant 4.775 mètres, ensuite de 2,46 ‰ pendant 5.751 mètres 27 et de 5,77 ‰ pendant 8.981 mètres 1.	322,46	Côté sud Janvier 1920 Côté nord Juillet 1920	22-4-1934	190	25.000 (1)

(1) Valeur correspondant à 6.200 liras or.

sous 30 000 V. En 1927, à cause des énormes quantités d'eau d'infiltration qu'il fallait évacuer (qui a exigé à elle seule une puissance de 6.590 CV.), on a dû installer une nouvelle ligne électrique à 30 000 V., capable d'augmenter la puissance totale de 2.000 kW. et dont la longueur a été de 31 km.

Dans les différentes cabines de transformation la tension de 30 000 V. était réduite à celle d'utilisation.

On a de plus en plus fait usage de l'énergie électrique fournie par les grands réseaux, laissant les groupes thermoélectriques comme réserve.

Tous les travaux de perforation ont été effectués au moyen de marteaux perforateurs à main, fonctionnant à l'air comprimé à 7 atm. Cet air sous pression était amené pour des conduites en acier dont le diamètre variait de 150 à 175 mm. La capacité des compresseurs était de 25 à 30 m³/sec. et la puissance absorbée de 160 à 220 CV. La pression moyenne de l'air dans les chantiers était d'environ 4,5 à 5 atm.

La dépense de l'énergie électrique pour l'air comprimé nécessaire à la perforation a été de 36×10^6 kWh.

Le service de traction à l'intérieur des chantiers s'effectuait au moyen de locomotives fonctionnant à l'air comprimé à 200 atm. leur capacité était de 1.400 litres et l'effort maximum de traction de 1.875 kg., l'écartement de ces locomotives était de 0,75 m. L'air comprimé était transporté dans les chantiers au moyen de conduites forcées, dont le diamètre interne était de 30 mm et elles avaient été essayées à 300 atm., le long de ces conduites étaient disposées des bouches de prise pour la charge de locomotives, et dans chaque chantier se trouvaient de grands réservoirs (de 20 m³), d'air à 200 atm., qui constituaient une réserve en cas d'une panne des compresseurs. Par la suite furent mises en service des locomotives dont la capacité atteignait 4.200 litres et l'effort maximum de traction 3.500 kg.

La dépense de l'énergie électrique pour ce système de traction s'est élevée pendant les travaux à 12.966.000 kWh.

Pour la ventilation il a fallu une installation rationnellement étudiée. L'air était envoyé par des puissants ventilateurs du type Sulzer et Cerpelli, d'une puissance moyenne de 170 CV., dans des canaux spécialement aménagés dans la maçonnerie de la partie complètement terminée du tunnel, dont la section variait de 6 à 6,5 m². Les parois internes de ces canaux ont été passées au vernis spécial, au silicate de soude, afin de les rendre imperméables et de réduire au minimum les pertes par frottement.

Comme les travaux s'avançaient et ce canal d'amené d'air devenait trop long on a tout d'abord installé un ventilateur intermédiaire de reprise et par la suite un autre encore. Vers la fin des travaux, lorsque à cause des irrptions continues des gaz inflammables, la ventilation devait être aussi efficace que possible, on est arrivé à introduire 7.600.000 m³ d'air, par 24 heures. La dépense de l'énergie électrique, pour ce service s'est élevée, pour la durée des travaux, à 22.228.000 kWh.

D'importantes installations ont dû être effectuées pour évacuer les eaux d'infiltration dans les chantiers de la galerie. Pour le côté sud les difficultés ont été écartées, grâce à la pente donnée au tracé du tunnel, ce qui a permis le dégagement rapide et automatique des eaux.

Il n'en fut pas de même lorsque les deux puits inclinés atteignent le niveau du tunnel. Dès que les excavations s'agrandirent et que la gare intérieure fut construite on y a installé une batterie de pompes, trois pompes alternatives et quatre centrifuge, dont le débit total était de 84 lit./sec. et la puissance globale de 544 CV. Cette première installation fut faite d'après les prévisions des études géologiques.

Les pompes puisaient l'eau dans un grand bassin construit à cet usage et le refoulement au moyen d'une conduite dont le diamètre est de 175 mm et qui en suivant les puits, sort à la surface. Mais par la suite, cette installation de pompage a dû être notablement augmentée, car l'importance des infiltrations s'accroissaient de plus en plus. C'est ainsi que l'installation complète et définitive de pompage était constituée par les trois premières pompes alternatives et par vingt-quatre centrifuges : la puissance installée s'élevait à 5.920 CV., le débit total de l'ensemble était de 971 lit./sec. Pour alimenter cette installation en énergie électrique, cette dernière a été amenée dans le sous-sol au moyen de 3 câbles : 3×35 , à 5 000 V. Dans le sous-sol se trouvait une cabine de transformation avec 10 transformateurs, dont la puissance totale atteignait 5.500 kVA.

La quantité d'eau refoulée par la station de pompage, du 25 mai 1925 au 31 mars 1930, s'élève à 21.524.300 m³, avec une consommation d'énergie électrique de 25.509.500 kWh. Le débit moyen journalier a été de 15.308 m³.

Pour la presque totalité des travaux on a adopté le système d'attaque belge, c'est-à-dire, on poursuivait le percement en deux points, l'un à la base du tunnel, qui était toujours le plus avancé, et l'autre au sommet.

La longueur des chantiers a été en moyenne de 700 m., pour les terrains constitués par du gravier, on les réduisait à 150 ou 200 mètres dans les zones des schistes argileux. Cette réduction a été nécessaire pour pouvoir effectuer le plus rapidement possible le revêtement en maçonnerie des fouilles et empêcher ainsi que les altérations des argiles, sous l'influence de l'humidité de l'air, puissent provoquer des pressions énormes qui représentent la difficulté la plus importante à vaincre, dans ce genre de terrain.

Le volume des matériaux extraits a été de 2.029.519 m³ ; à cet effet, on a employé 940 tonnes de dynamite, plus de 4×10^6 de cartouches et 5.000 km. de mèches.

La consommation d'énergie thermique, thermoélectrique et électrique (exception faite de celle produite par les locomotives à vapeur, destinées au transport des matériaux), s'est élevée à 110.104.000 kWh. Les journées d'ouvriers employés, pour les travaux, furent de 5.268.130.

La gare intérieure, avec les voies de garage, a une longueur totale de 1.224 m. Étant donné qu'elle a une section assez importante, en moyenne 226 m², on a dû prendre des précautions spéciales pour sa construction.

On effectuait tout d'abord les deux tranchées latérales, que l'on renforçait par des ouvrages de maçonnerie et on complétait entièrement par le revêtement. Après cela on s'attaquait à la partie supérieure qui devait constituer la voûte en forme de couronne circulaire, qui, elle aussi, était rapidement renforcée par les ouvrages de maçonnerie ; ce n'est qu'après ces travaux que l'on déblayait le noyau central. La gare elle-même est constituée par une chambre de 153,96 m. d'air d'où partent deux galeries à voie simple, une de chaque côté, qui, après un parcours en forme d'arc de cercle, rejoignent la « Grande Galleria » ; c'est dans ces voies de garages que seront garés les trains qui doivent laisser le passage aux trains rapides, puis ils pourront reprendre leur route sans effectuer d'autres manœuvres.

La maçonnerie, dans le tunnel et le revêtement, a une épaisseur qui varie de 0,54 à 1,02 m. et elle est faite en briques ou avec des blocs de béton ; ces épaisseurs variables s'adaptent suivant la nature du terrain rencontré. Dans la chambre intérieure, qui constitue la gare, l'épaisseur du revêtement de la voûte est de 1,23 m. et celle du parement vertical, contre la roche, de 1,85 m.

A l'intérieur du tunnel se trouvent alternativement disposées des niches de refuge, tous les 50 m. A des distances opportunément choisies se trouvent trois refuges plus importants pour le dépôt des outils, des équipes d'ouvriers d'entretien, ainsi que cinq autres pour des échelles sur chariots et cinq pour les rails.

* * *

Parmi les difficultés les plus graves à surmonter, pendant les travaux, il faut certes considérer celles provenant des pressions énormes produites par le terrain.

Le tronçon le plus dur fut celui entre les progressions 2310 et 3000 du côté nord. Malgré les précautions prises, en réduisant la longueur des chantiers et bien que la percée inférieure fut toujours très solidement renforcée, le déplacement du terrain argileux déformait celle-ci jusqu'à rendre impossible le passage des wagonnets en mettant aussi en danger les conduites d'air sous pression. Non seulement les travaux devaient être repris à nouveau, mais on vivait dans la crainte pour la sécurité d'équipes entières d'ouvriers. Il fallait donc procéder très lentement, en renforçant toujours plus les armatures des fouilles.

D'énormes poutres en chêne d'une section carrée, de 40 cm. de côté, ont été très souvent littéralement écrasées. Même, avec le revêtement entièrement terminé, ces actions internes énormes l'ont déformé. Plus de 7.800 m³ de maçonnerie ont dû être repris de nouveau et refaits.

L'avancement des travaux subissait des retard trop importants et le Conseil Supérieur des Travaux Publics dut chercher activement un remède. On abandonna la méthode de percement employée et on voulut suivre celle dite du « bouclier » qui a été à plusieurs reprises employée à l'étranger. Mais, vue la surface trop grande de cette galerie, cette méthode ne pouvait être adoptée et même la meilleure Maison constructrice, spécialisée dans ce genre de travaux, a déclaré ne pouvoir proposer, pour ce cas, son matériel. Pour pouvoir reprendre la vitesse normale de la perforation, on a eu recours à la méthode suivante : On constituait l'armature de la percée inférieure au moyen d'un revêtement constitué par des pieux, en pin, dont l'épaisseur était de 50 cm., disposés en quinconce le long des directrices. La forme de l'accès ainsi formée était semi-circulaire. Ainsi les poussées du terrain furent moins grandes et trouvaient une réaction efficace sur le tube circulaire en bois, ainsi constitué.

Ces difficultés furent encore aggravées par la présence de gaz inflammables constitués presque exclusivement par du méthane 97% et le reste d'azote, d'anhydride carbonique et d'hydrocarbures non saturés, qui émanaient de toutes les enfractuosités des roches ; quelques fois, sous forme d'un véritable jet sous pression. Ces gaz s'accumulaient, à cause de leur faible poids spécifique, dans les parties hautes des chantiers, surtout derrière les armatures et se mélangeaient avec l'air. En atteignant les proportions voulues, pour former un mélange détonnant, au contact d'une flamme ou au moment de l'allumage d'une mine, celui-ci explosait en anéantissant l'armature de soutènement et en faisant de nombreuses victimes.

Devant ces dangers terribles les précautions d'ordre général qui furent adoptées peuvent se résumer ainsi :

1° Éclairage au moyen de lampes électriques, tant pour les installations fixes que pour les baladeuses, et cela avec des batteries d'accumulateurs ;

2° On a adopté des lampes signalisatrices de gaz dans tous les chantiers d'attaque ;

3° Allumage électrique des mines à distance ;

4° Inspection régulière des chantiers par des spécialistes et

inflammation des masses de gaz accumulées à des périodes variables (suivant l'importance des émanations), et cela au moyen d'allumeur électrique à distance (80 m. environ ;

5° Installation, dans les chantiers, de conduites d'eau sous pression afin de pouvoir combattre les incendies éventuels ;

6° Transport de matériaux d'excavation ou de construction par des locomotives à air comprimé ;

7° Installation d'aspirateurs spéciaux pour l'extraction des gaz inflammables des chantiers, surtout des « points morts », où l'on pouvait craindre que l'air de ventilation ordinaire ne puisse réussir à assurer une dilution suffisante ;

8° Eloignement des ouvriers des points d'attaque, au moment de l'allumage des mines et de celui partiel et volontaire des gaz. Défense absolue de fumer et de porter des lampes à flammes libres ;

9° Introduction, dans les chantiers, d'énormes quantités d'air, au moyen d'installations adéquates de ventilation.

Malgré toutes ces précautions, on n'a pas pu totalement empêcher au gaz de développer son action néfaste, surtout dans les chantiers d'attaque, côté Nord.

De ce côté, très rapidement (déjà à la progression 270), se vérifièrent d'importantes émanations que l'on alluma périodiquement, avant que des quantités trop grandes s'accumulent. Ces allumages produisent des incendies partiels, mais sans victimes. C'est le 3 août 1928, à la progression 4937, que s'est produite une émanation beaucoup plus importante, en provoquant un incendie général des chantiers et dont les proportions furent telles que les travaux durent être suspendus, pendant six mois. L'incendie s'est déclaré au moment de l'allumage d'une mine, il se propagea avec une rapidité surprenante. La fumée et les gaz produits par la combustion et la distillation du bois du chantier, obligèrent les ouvriers à évacuer ; même ceux qui dirigeaient les cabines extrêmes et intermédiaire de ventilation, de ce fait, il ne restait en action que les ventilateurs de l'entrée.

La nuit suivante une explosion terrible détruit 320 mètres du canal de ventilation. Une équipe spécialisée de sapeurs tenta de lutter contre le désastre. Montés sur une locomotive à air comprimé, qui leur fournissait aussi de l'air pour la respiration, ils s'avancèrent le plus loin possible et mirent en action les lances dans l'espoir de freiner l'activité dévastatrice des flammes. Mais tous les efforts restèrent vains, il fallait se résigner à inonder les chantiers, jusqu'à une hauteur de 4,50 m. en les murant.

Pour ne pas trop retarder les travaux, qui furent ainsi interrompus, on a procédé au percement d'une galerie latérale longue de plus de 200 m. à côté de celle inondée et à 15 m. à sa droite. On a pu ainsi progresser de 100 m. la grande galerie qui, à partir du 10 décembre de la même année, a pu être réunie à l'ancien tracé complètement éteint et récupéré.

D'après les calculs faits on a pu évaluer que les émanations de gaz et les incendies qu'ils ont provoqués ont fait augmenter le prix de la main-d'œuvre de 11% et une augmentation de l'énergie électrique consommée de 7%.

L'incendie du 3 août 1928 et la suspension des travaux, jusqu'au 12 février 1929, ont coûté au total 3 millions de livres.

* * *

L'eau fut un ennui non moins obstiné que les gaz inflammables. Elle a imposé aux ouvriers des conditions très dures de travail et aux techniciens des problèmes difficiles, qu'il fallait résoudre rapidement et efficacement. Ce n'est qu'en avril 1924 que l'on a rencontré la première source importante d'eau, à la progression 2400, dont le débit s'élevait de 60 à 97 litres/sec. Une deuxième

irruption s'est produite le 4 juin, de la même année, à la progression 2584 avec un débit de 56 lit./sec.

Par la suite, les difficultés ne firent qu'augmenter : en novembre 1926, à la progression 4831, on a rencontré une source très importante, dont le débit atteignait la valeur de 440 lit./sec.

Les précautions prises furent celles de construire des bassins spéciaux où l'eau s'accumulait et d'où on la puisait pour l'évacuer à l'extérieur.

Le 4 novembre 1927 l'invasion des eaux fut telle à l'extrémité inférieure de la galerie, que la suspension des travaux s'imposa.

D'autres irruptions d'eau se produisirent et celles-ci, sous forte pression, jusqu'à 12 atmosphères, mais dans ces cas le débit ne dépassa jamais 300 lit./sec. Lorsque le tracé du chantier était tel que la pente naturelle aidait l'écoulement des eaux, tout allait pour le mieux, mais quand le chantier se trouvait en contre pente, il fallait une installation de pompage suffisante pour extraire toute la quantité d'eau qui s'y présentait et à cet effet, on a construit un immense réservoir dans la partie centrale du tunnel, d'où les pompes puisaient l'eau, qui ainsi s'accumulait.

Malgré toutes ces difficultés, les travaux furent menés avec la plus grande célérité et le 23 décembre 1928 s'effectua, en présence des personnalités représentant le gouvernement, la première rencontre des équipes de l'entrée, côté Florence, et du puits n° 2 ; le 4 décembre 1929 tombait, sous les derniers coups de pics, le dernier diaphragme qui constituait le dernier obstacle de la communication souterraine, entre le versant émilien et le versant toscan.

Pendant la construction de la maçonnerie de revêtement de la galerie, on a prévu un drainage, avec collecteur, pour recueillir les eaux qui se frayait un passage et parvenaient à filtrer à travers cette maçonnerie.

Il a fallu supprimer cette humidité et éviter ainsi le danger auquel encouraient les appareillages de la ligne électrique. A cet effet, on a parfaitement imperméabilisé, sur la plus grande partie de l'ouvrage, deux bandes larges de 1,70 m., au dessus des rails.

* *

La construction de la « Direttissima », à cause de la nature du terrain à traverser, a obligé les constructeurs à créer de nombreux ouvrages d'art, très importants : tunnels et viaducs.

Outre la « Grande Galleria », le tunnel du Mont-Adone est lui aussi assez important, tant par son importance que par les difficultés qu'il a fallu surmonter.

En passant en revue tout le tracé de la « Direttissima ». Voici quelles en sont les caractéristiques générales :

Cette nouvelle artère italienne comprend 46 tronçons rectilignes, pour une longueur totale de 60,659 km. ; 59 courbes, dont le développement représente une longueur de 22,445 km. Au point de vue altimétrique, cette ligne comprend 40,263 km. de rampe ; 2,393 km. de palier et 40,248 km. de pente. La préoccupation des constructeurs d'éviter tous les passages à niveau, même pour des routes secondaires, les a conduit à établir la ligne sur 50,896 km. de remblais et dans 11,181 km. de tranchées, qui ont demandé, pour leur construction, la manutention de 1.600.000 m³ de matériaux.

Les ouvrages d'art sur les cours d'eau ou sur les vallées traversées ne sont pas métalliques. La plus grande partie est en maçonnerie et chaux hydraulique et quelques-uns seulement en béton armé.

Ils sont au nombre de 138, avec ouverture inférieure à 12 m. et 38, avec des ouvertures plus grandes, leur longueur totale est de 4052 m.

Pour tous ces ouvrages d'art le long de la « Direttissima », on a fait des excavations de 300.000 m³ et 490.000 m³ de maçonnerie.

Les travaux exécutés pour le tracé de cette ligne, vu la constitution peu compacte du terrain, ont provoqué des éboulis très importants, qui ont nécessité des ouvrages de soutènement et de consolidation très importants ; les excavations se rapportant à ce genre de travaux, s'élèvent à 270.000 m³, tandis que le volume de maçonnerie employé s'élève à 360.000 m³.

La « Direttissima » compte trente tunnels, dont la longueur totale est de 36.805,95 m. Outre la « Grande Galleria », trois autres ont une longueur supérieure à 1 km. et quatre entre 500 et 1000 m.

Leur construction fut facile et on employa les méthodes usuelles à ces travaux ; le prix de revient, par mètre courant, fut en moyenne de 6.500 liras.

Nous ne donnerons que très brièvement et seulement des deux principaux tunnels, quelques caractéristiques :

Le tunnel du Mont Adone est long de 7035,35 m., il est rectiligne, exception faite d'un parcours de 591,34 m. qui est curviligne, avec rayon de courbure de 2000 m. Au point de vue altimétrique son allure est symétrique, avec pente de 2 ‰ par rapport au palier moyen, dont la longueur est de 460,84 m.

Les revêtements de maçonnerie pour la calotte supérieure et les parties latérales ont des épaisseurs de 0,54 m. à 0,81 m. et pour la calotte inférieure, de 0,40 à 0,81 m.

Les travaux furent commencés aux deux extrémités le 9 mars 1921 et le 24 mars 1922, et la rencontre s'est effectuée le 28 octobre 1926. On y installa des groupes thermo-électriques pour les besoins des chantiers, pour une puissance de 460 CV. ; mais par la suite ces groupes Diesel restèrent comme réserve et l'énergie nécessaire fut fournie par un réseau de distribution vicinal. Le prix de revient par mètre courant de ce tunnel, s'éleva à 10.700 liras.

Le tunnel de Pian di Setta est long de 3052 m., dont 1712 m. rectilignes et 1340 m. en courbe, avec rayon de courbure 1600 m. Quant à l'allure altimétrique, c'est une rampe de 8 ‰, dans le sens de Bologne à Firenze.

Les travaux sur ce tunnel furent parsemés de fréquentes et très importantes difficultés ; le terrain était très mouvant et donnait lieu à des pressions internes très importantes. D'autre part, les émanations de gaz inflammables furent nombreuses et provoquèrent de nombreux accidents et incendies, dont l'un dura une cinquantaine de jours.

A cause de ces difficultés l'avancement moyen mensuel n'a pas été supérieur à 27 m. Les travaux furent commencés le 18 septembre 1921, du côté Nord, et le 2 avril 1925, du côté sud, et la rencontre s'est effectuée le 28 mars 1928.

* *

Dans ce qui suit, nous donnons quelques renseignements sur l'armement de la voie ferrée et de son électrification.

L'écartement de cette voie est de 1,435 m., dans la partie rectiligne, et dans les courbes, dont le rayon de courbure est supérieur à 750 m., il est de 1,440 m. ; dans les parties en courbe, avec rayon de courbure, entre 750 et 700 m., et de 1,445 m. pour les courbes où le rayon de courbure est inférieur à 700 m.

La surélévation du rail extérieur (en relation avec le rayon de courbure minimum, 700 et 600 m.), a été fixée respectivement à 12 et 13 cm. ; celle-ci étant fonction de la vitesse maxima compatible avec le rayon de courbure minimum. On a de plus raccordé, au moyen de tronçons continus et uniformes, avec une pente inférieure à 1,5 ‰, la différence de niveau entre les deux

rails dans le tronçon qui précède et qui suit la courbe. Au point de vue planimétrique, les parties rectilignes sont raccordées aux courbes au moyen d'arcs paraboliques du troisième degré, tracés suivant la méthode Nordling, qui consiste à insérer, entre la partie rectiligne tangente à l'arc de cercle concentrique à la courbe primitive, mais de rayon inférieur, une courbe de raccordement de développement $l = \frac{h}{i}$ (h = surélévation, $i = 1,5\text{‰}$) et

dont la moitié suit la tangente à la courbe primitive, et l'autre moitié, la courbe primitive elle-même, à partir du point de tangence.

On a employé des rails longs de 18 m. et dont le poids, par mètre courant est de 50,5 kg. posés sur 30 traverses ; pour les voies de garage les rails sont longs de 18 m. et leur poids est de 46,5 m. par mètre courant ; ils sont posés sur 26 traverses.

Sur la « Direttissima », l'exploitation par la traction à vapeur aurait été impossible, sans effectuer d'importantes installations de ventilation, à cause des grands tunnels.

En adoptant la traction électrique, non seulement on a évité ces installations spéciales, mais on a pu aussi augmenter le nombre de trains, en utilisant ainsi mieux la capacité de la ligne.

La décision, en faveur de la traction électrique pour la « Direttissima » Bologna-Firenze, a été prise à la suite d'autres considérations d'ordre général dont l'importance, pour certains pays, comme l'Italie, par exemple, est capitale, savoir : réduction du charbon importé et développement consécutif de la richesse nationale, l'énergie hydraulique. En outre, avec la traction électrique, on aboutit à un poids par unité de puissance bien inférieur à celui que permet la traction à vapeur. On atteint aussi des vitesses moyennes ainsi que des accélérations bien supérieures à celles de la traction à vapeur et par conséquent des vitesses commerciales beaucoup plus élevées.

Parmi les différents systèmes de traction électrique, on a donné la préférence à celui par courant continu, à 3000 V., avec prise de courant par fil de contact aérien, car il permet de réaliser l'installation de cette ligne de contact aussi simple que possible ; d'autre part, on peut obtenir une assez grande facilité de réglage de la marche et aussi augmenter sensiblement la distance entre les sous-stations.

La Porrettana qui était déjà électrifiée recevait l'énergie électrique qui lui était nécessaire (35×10^6 kWh.), de plusieurs sociétés régionales.

La nouvelle centrale de Suviana qui utilise l'énergie hydraulique de l'Alto Resio pourra fournir 45×10^6 kWh. Les 80×10^6 kWh. ainsi disponibles suffiront à répondre aux demandes de la traction électrique sur les deux lignes électrifiées qui relient Bologne à Florence.

Les exigences de la « Direttissima », ont accéléré aussi la réalisation du plan général de l'électrification de l'Italie, par l'exécution des lignes à haute tension :

Vergato-Grizzana (ligne double 2 × 3 phases), à 60 kV. de 7,5 km	
Grizzana-Vaiano (ligne simple 3 —) à 60 — de 36 —	
Suviana-Castiglione dei Popoli 3 —) à 60 — à 12 —	
Vaiano-Prato (ligne double 2 × 3 —) à 60 — à 14 —	
Bologna-Rifredi (ligne simple 3 —) à 130 — à 120 —	

Cette dernière fait partie de la ligne Nord-Sud de grand transport de l'énergie à 130 kV, pour les réseaux italiens de traction, qui devra assurer l'alimentation de toutes les lignes électrifiées et qui permettra le transport à grande distance de l'énergie des

centres importants de production pour la diriger vers les centres d'utilisation.

L'alimentation de la ligne de contact de la « Direttissima » s'effectue par l'intermédiaire de cinq sous-stations de transformation à redresseurs à vapeur de mercure, avec trois groupes de 2000 kW, dans chaque sous-station, dont deux groupes en service et un de réserve.

Les cylindres redresseurs ont été exécutés d'après les plus récents perfectionnements. Toutes les anodes sont munies de grilles polarisées, au moyen desquelles est rendue possible la récupération de l'énergie, qui autrement devrait être dissipée. On obtient aussi un meilleur fonctionnement des redresseurs, ainsi que la régulation de la tension et une meilleure protection contre les courts-circuits extérieurs.

La nouvelle artère est dotée d'une sous-station ambulante, dont la puissance est de 2000 kW. ; elle est destinée comme sous-station de réserve, en cas d'avarie d'une des sous-stations fixes. D'autre part, elle pourra toujours être employée en des localités déterminées de la ligne lorsque les exigences du trafic l'exigeront.

La sous-station ambulante est montée sur un wagon et naturellement elle est destinée pour fonctionner à l'extérieur. Avec cette sous-station ambulante il est possible de transformer le courant triphasé 60 kV. en courant continu à 3 kV.

L'installation comprend un transformateur de puissance, un redresseur, avec ses accessoires, l'appareillage pour le courant continu et alternatif, celui pour le fonctionnement automatique, ainsi que tous les circuits auxiliaires.

La ligne de prise de courant est aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des tunnels, du type à suspension longitudinale, avec contrepoids, qui est particulièrement favorable aux vitesses élevées, prévues pour l'exploitation de la « Direttissima ».

Le contrepoids permet, en effet, de maintenir constante la tension des fils de prise du courant, même avec des variations sensibles de la température, ce qui assure un contact plus régulier entre le fil et le trolley, même pour des portées assez importantes.

* * *

L'installation des « blocs » est aussi automatique, les signaux, le long de la ligne, sont commandés par les trains eux-mêmes, au moyen de commandes électriques à distance.

Le circuit qui alimente l'installation complète des « blocs », ainsi que les services d'éclairage, est constitué par une ligne principale à 11 kV. qui comporte des centres de transformation à 150 V. Dans les tunnels, le transport se fait par des câbles à 5 000 V.

Les cabines de manœuvre pour les aiguillages sont munies de tableaux lumineux sur lesquels il est aisé de voir quelles sont les voies libres ou bloquées.

La « Direttissima » est en service depuis le 21 avril 1934. Les efforts des techniciens et des ouvriers italiens ont été couronnés d'un succès bien mérité. Cette œuvre grandiose fut rapidement terminée avec une énergie louable, car elle ne constitue pas seulement un résultat technique, mais aussi social, ayant procuré en ces temps difficiles, 16.936.300 journées de travail d'ouvriers.

G. KOLOVITCH.

d'après *Annali Dei Lavori Pubblici*. Gen. 1934.