

M2: la nouvelle ligne de métro de Lausanne

Le 24 novembre 2002, le peuple vaudois a voté clairement en faveur de la création d'une ligne de transport public performante reliant le bas et le haut de la ville de Lausanne dans un axe nord-sud. Planifiée dans les années 1990, la construction du nouveau métro a pu débuter au printemps 2004. A sa mise en service prévue pour l'automne 2008, la nouvelle ligne de métro m2 constituera l'épine dorsale du futur réseau des Transports Publics de la Région Lausannoise.

Par Marc Badoux *

L'infrastructure du m2, constituée de tunnels, tranchées couvertes, stations et ponts s'étend sur une longueur de 6 km à 90 % en milieu souterrain. Le système de transport est dimensionné pour une capacité de 25 millions de passagers par an et pour pouvoir fonctionner à une cadence de 2 minutes. Les quais des stations sont équipés de portes palières automatiques. Les rames composées de deux véhicules sont équipées de moteurs électriques linéaires et tractées par des pneumatiques sur rail fer. Elles circuleront en mode «driverless», c'est-à-dire entièrement automatique, une première pour la Suisse et pour une ville de petite taille comme Lausanne. Le m2 sera, par ailleurs, le métro le plus pentu du monde.

L'infrastructure du m2

La construction de l'infrastructure du nouveau m2 a requis la rénovation lourde du tronçon Ouchy-Flon et son extension vers le nord. Le tronçon existant, long de 1,5 km, a été construit pour la «Ficelle», le premier funiculaire d'Europe mis en service en 1877. Le projet m2 s'inscrit donc dans la continuité des projets d'infrastructure réalisés à Lausanne depuis plusieurs générations pour relever

le défi de développer la mobilité publique et privée dans une topographie difficile.

Long d'environ 6 km, le tracé du nouveau métro m2 relie Ouchy à la station des Croisettes à Epalinges (figure 1). Il franchit des pentes atteignant 12 % – la pente moyenne étant de 5,7 % – pour passer de 373 m à 711 m d'altitude. La ligne est entièrement en site propre et à ciel ouvert sur trois petits tronçons seulement (figures 2, 3 et 4). Elle inclut 14 stations et un garage-atelier (figure 5) situé à proximité de son extrémité nord. A l'exception de deux d'entre elles (Fourmi et Ours), les stations sont situées à faible profondeur (5 à 15 m) pour favoriser leur accessibilité sans remontées mécaniques et permettre l'éclairage par la lumière naturelle. Les stations sont relativement petites («à l'échelle de Lausanne, plus petite ville du monde avec un métro automatique»), puisque la longueur des quais ne dépasse pas 30 m. Conçu comme un «ascenseur urbain», le m2 fera circuler des rames courtes (deux véhicules) à une cadence élevée aux heures de pointe (3 min à la mise en service, 2 min à terme).

Entre Ouchy et le boulevard de Grancy, le m2 emprunte le «tronçon historique» du m2 qui a été reconstruit pour passer de la voie simple de l'ancien m2 à la double voie



* Dr Marc Badoux,
ingénieur civil EPF,
directeur du projet m2,
Métro Lausanne-Ouchy SA,
Renens

M2: Die neue Metro-Linie in Lausanne

Am 24. November 2002 stimmte die Waadtländer Bevölkerung mit grossem Mehr der Schaffung einer leistungsfähigen ÖV-Verbindung zwischen dem unteren und dem oberen Teil der Stadt Lausanne zu. Eine neue U-Bahn-Strecke wurde bereits in den 1990er-Jahren geplant. Mit dem Bau konnte dann im Frühjahr 2004 begonnen werden. Diesen Herbst soll die Metro M2 in Betrieb gehen und ein Rückgrat im künftigen ÖV-Netz der Region Lausanne bilden.



1: Le tracé de la nouvelle ligne de métro m2 de Lausanne.

1: Das Trasse der neuen Metro-Linie M2 in Lausanne.

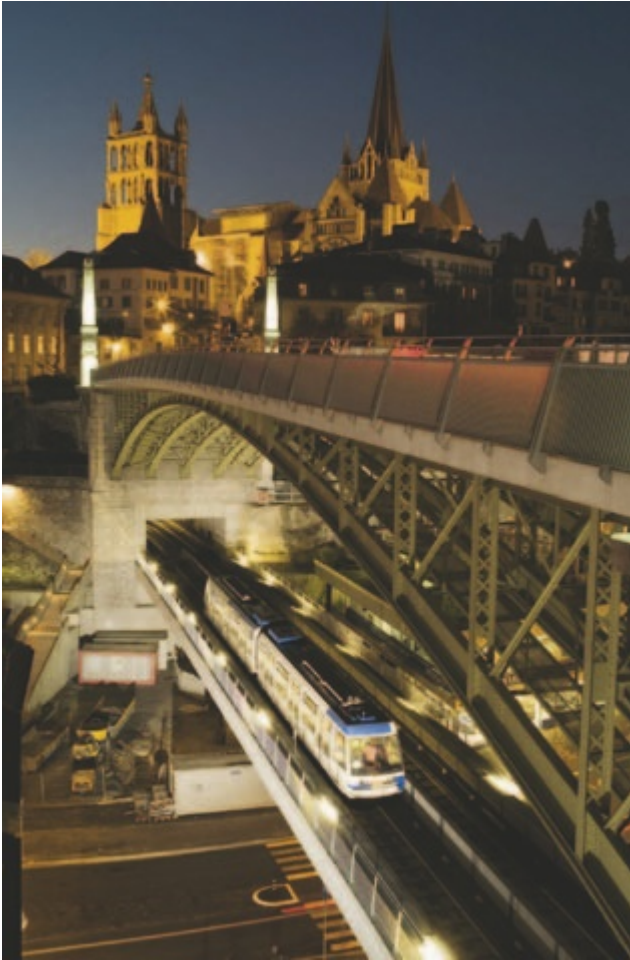
du nouveau. De Grancy à la station Gare (CFF), le m2 est à voie unique sur un tronçon d'environ 300 m, car il emprunte un tunnel étroit construit au 19^e siècle sous la gare CFF. Le radier de ce tunnel a été adapté pour répondre aux caractéristiques de la voie du nouveau métro. De la gare CFF jusqu'à son terminus aux Croisettes, le m2 est à double voie et peut garantir une cadence des rames inférieure à deux minutes. Depuis la station Flon qui sert d'interface entre le TSOL, le m2 et le LEB et sera la troisième gare de Suisse romande, le tracé abaissé d'un niveau se poursuit sous la place de l'Europe. Il se prolonge par le tunnel St-Laurent qui permet de rejoindre la station de la Riponne. C'est pendant la construction de ce tunnel à faible profondeur qu'un accident de chantier s'est produit le 22 février 2005. L'effondrement du front du tunnel sous la place Saint-Laurent a créé une chapelle d'environ 1500 m³ entre la calotte du tunnel et la surface. Ce grave accident n'a heureusement eu que des conséquences matérielles. Il a requis la mise en œuvre de mesures très importantes pour la maîtrise du sinistre, puis la reconstruction de la zone de l'accident et du tunnel effondré.

Depuis la Riponne, le tracé passe sous la rue de la Madeleine pour entrer dans le tunnel Viret qui passe sous le quartier de la Cité et mène le m2 dans la culée ouest du pont Bessières. Ce tunnel construit dans la molasse passe au sud de la cathédrale.

Au débouché du tunnel Viret, le m2 passe sous le pont Bessières dont il traverse les piles et culées de part en part en leurs axes à mi-hauteur, en laissant un gabarit de passage routier de cinq mètres au-dessus de la rue St-Martin. Le pont éponyme en béton précontraint a trois travées dont les portées respectent la règle d'or qui a présidé à la construction du pont Bessières. Côté Caroline, la station Bessières est construite partiellement à ciel ouvert, entre la pile et la culée du pont Bessières, et partiellement en souterrain en direction de l'est. Elle précède le tunnel Langallerie qui a été excavé dans des terrains meubles de très mauvaise qualité et à faible profondeur (3 m sous les fondations d'un bâtiment) et qui a été réalisé en section divisée (pieds-droits, calotte puis stross).

Le tronçon du m2 sis sous la rue du Tribunal fédéral est réalisé au moyen d'une tranchée couverte faite de parois constituées de pieux forés, butés en partie supérieure par une dalle qui sert de couverture à l'ouvrage souterrain. Cette section en terrain meuble a été excavée «en taupes» après la réalisation de la dalle de couverture. La tranchée du Tribunal fédéral est prolongée en direction nord par le tunnel Perdonnet qui débouche dans la station Ours, réalisée sous la place éponyme. Celle-ci, dont la profondeur est de 25 mètres, a été construite à partir d'un puits rectangulaire dont les parois sont faites de pieux forés. Ce puits permet d'assurer les liaisons verticales entre les quais et la surface. Le tracé en direction nord se poursuit par le tunnel du Bugnon qui mène à la station CHUV et le tunnel des Falaises qui débouche dans le vallon du Flon au sud-ouest du quartier de la Sallaz.

On arrive à la station Sallaz, seule station à quai central, par le pont du Vallon. Cet ouvrage consiste en une auge en béton armé sur un remblai d'environ 70000 m³, réalisé avec les matériaux d'excavation des tunnels avoisnants. La station Sallaz implantée entre l'usine Tridel et le quartier de la Sallaz, dessert une interface bus-métro importante. Le tracé présente en cet endroit un rebroussement qui permet de garantir au circuit gare CFF-La Sallaz



2: Le pont Saint-Martin sous le pont Bessières.

2: Die Saint Martin-Brücke liegt direkt unter der Bessières-Brücke.

une fréquence double des rames. Le tracé pénètre ensuite dans le plus long tunnel de la ligne: le tunnel de la route de Berne. 665 mètres plus loin, celui-ci débouche dans la station Fourmi, sise à 25 mètres de profondeur. Le tracé se poursuit par le tunnel AR (qui passe sous l'autoroute A9) et la tranchée couverte Jonction, pour aboutir à la station Vennes qui dessert le P+R du même nom. Le solde du tracé entre la station Vennes et la station Croisettes est une tranchée couverte réalisée à ciel ouvert, qui longe la route de Berne sur son côté est. Depuis la station Vennes en direction est, une voie en tranchée couverte permet d'accéder au garage-atelier des rames, qui est situé en bordure de l'autoroute. Ce secteur est également doté d'une voie d'essais, qui permet de tester le fonctionnement des rames avant leur insertion dans le circuit principal.

Le principal défi des travaux de génie civil a été la construction de tunnels à faible profondeur dans des sols de qualité variable et dans un milieu urbain. Les tunnels ont été excavés au moyen de haveuses, principalement dans la molasse. Les revêtements des tunnels ont été réalisés en béton projeté fibré. Ils ne sont pas étanchés (à l'exception du tunnel Viret qui dispose d'une étanchéité projetée). Dans les zones de terrains meubles, différentes techniques de travaux spéciaux (principalement voûtes-parapluies et jet-grouting) ont été mises en œuvre pour assurer le soutènement des tunnels. Les deux tiers des matériaux d'excavation ont pu être recyclés dans des remblais liés au projet.



3: Le tiroir de retournement de la Sallaz.

3: Kreuzungsstelle La Sallaz.

Le système de transport

Les composants essentiels d'un métro automatique comme le m2 sont:

- les trains qui transportent les clients en sécurité et confort,
- la voie qui guide les trains et leur fournit l'énergie,
- le système «énergie» qui transforme le courant et le «livre» aux trains,
- Les automatismes qui pilotent les trains et surveillent leur comportement.

Les études du système de transport du m2 s'articulent autour des quatre axes suivants: le fonctionnement, l'exploitation, les performances et la sécurité. Les études prospectives ont conduit à préconiser l'usage de trains composés de deux voitures et d'assurer une fréquence de desserte en milieu de ligne double de cette extrémité. Les contraintes d'environnement sont exigeantes: des pentes élevées, un parcours sinueux, des tronçons aériens, une section à voie unique et un climat rigoureux. Le cahier des charges, associé au souci de ne pas avoir à



4: Le tunnel de la route de Berne.

4: Der Tunnel unter der Bernstrasse.



5: L'atelier du m2.

5: Die Fabrikation der Metro-Fahrzeuge.

«tester» un système entièrement nouveau à Lausanne, a conduit le maître d'ouvrage à choisir un métro sans conducteur sur pneus, dont les principaux constituants avaient déjà fait leurs preuves sur d'autres sites: rames, voie et portes de quai à la RATP, automatismes à Singapour.

Les études d'exploitabilité ont notamment conduit à définir les mesures à prendre pour chaque différent type d'incident: évacuation des trains en tunnel, acheminement exceptionnel d'un train en conduite manuelle, mise en place d'un service provisoire, etc. De façon similaire, ces études ont aussi défini les règles d'entretien du matériel, notamment pour le gros entretien qui nécessite la mise hors-service de la ligne.

Les études de performances assurent que la capacité du système répond à la demande. Elles se basent sur des simulations mettant en jeu la capacité des rames, l'intervalle entre deux rames dans une direction donnée, le temps d'arrêt pour permettre aux personnes de monter et de descendre de la rame. Cette étude a été particulièrement importante dans le cas du m2 qui contient un tronçon à voie unique.

En ce qui concerne le matériel roulant, la structure de la voiture (caisse en aluminium) est reprise du métro parisien MP89 en service depuis plusieurs années. La chaîne de traction (ensemble des équipements électriques de puissance transformant le courant continu en courant alternatif pour les moteurs) est logée dans des coffres d'équipement sous le châssis, une solution également reconduite à partir d'autres métros. Le train dispose également d'équipements auxiliaires de production d'énergie (convertisseurs) qui fournissent le courant nécessaire pour les ventilateurs, les moteurs de portes, le chauffage, etc. La topologie du tracé a mené au choix

d'un métro sur pneus: en dehors d'un système à crémaillère, cette solution était en effet la seule à permettre le franchissement des pentes à 12 % du tracé, tout en garantissant une adhérence susceptible de permettre un redémarrage dans les stations en pente. La technologie du métro sur pneus a été développée il y a une cinquantaine d'années pour des raisons de confort et a fait ses preuves dans une vingtaine de réseaux de transport. Pour répondre aux contraintes de la ligne et aux exigences réglementaires, le m2 comporte trois types de freinage:

- un frein électrique qui transforme les moteurs de traction en génératrices lors des freinages. L'énergie ainsi créée est soit réinjectée sur la ligne (alimentation d'un autre train), soit dissipée par échauffement (résistance en toiture). Il s'agit du mode de freinage le plus utilisé.
- un frein à sabot, constitué de semelles venant s'appliquer sur la roue auxiliaire. Ce frein est utilisé comme complément au frein électrique, à basse vitesse ou en cas d'urgence.
- un frein à patins magnétiques, fonctionnant grâce à de forts aimants agissant sur les rails de roulement. Sa fonction principale est celle de frein d'immobilisation (il permet à lui seul de tenir le train dans des pentes à 12 %), mais il est aussi utilisé en cas de freinage d'urgence.

La voie joue un rôle mécanique (support et guidage des trains, transmission au sol des efforts de traction ou freinage), tout en assurant également une fonction électrique (retour de courant, détection de présence des trains par circuits de voie). Le m2 utilise une voie ferroviaire classique qui présente un écartement normal, à laquelle ont été ajoutées deux pistes de roulement et deux barres de guidage (figure 6). Ces dernières sont montées

sur des isolateurs puisqu'elles servent à l'alimentation en courant de traction des convois (courant continu 750 V).

Des mesures particulières ont été prises pour disposer d'une adhérence maximale entre les roues et les pistes: rainurage de la surface pour créer des aspérités et éviter l'aquaplaning, chauffage des pistes par résistances placées sous les ailes des profils. En plus des roues pneumatiques, les trains sont munis de roues en fer qui servent d'une part à la sécurité en cas de dégonflement d'un pneu et d'autre part de système de guidage dans les aiguillages. Pour des raisons d'économie, d'entretien et de gabarit d'espace libre des tunnels, on a retenu la solution d'une pose de la voie sur du béton. Habituellement dévolu au ballast, l'amortissement des vibrations est ici assuré par une semelle en caoutchouc faite de deux structures cellulaires fermées placées sous chaque traverse et tenue par un chausson élastique.

Le m2 est alimenté par son propre réseau de transformation et de distribution d'énergie pour trois raisons:

- besoin d'une disponibilité très élevée (garantie en outre par de multiples redondances et un système de surveillance),
- l'alimentation des trains en courant continu et le danger lié à sa distribution par un troisième rail,
- la facturation plus avantageuse de l'énergie au tarif «moyenne tension».

Deux liaisons mettent en connexion le réseau «moyenne tension» (11 500 V) des Services Industriels de la Ville de Lausanne à celui du m2. Ce dernier est composé de deux câbles qui assurent ainsi la distribution redondée de l'énergie vers neuf postes de transformation et quatre sous-stations qui alimentent les dispositifs de traction des rames. Les postes de transformation alimentent les équipements des stations et des tunnels en basse tension 400 V. Les «gros» consommateurs d'énergie, principalement le chauffage de voie et la ventilation incendie, sont directement reliés au tableau de distribution du transformateur.

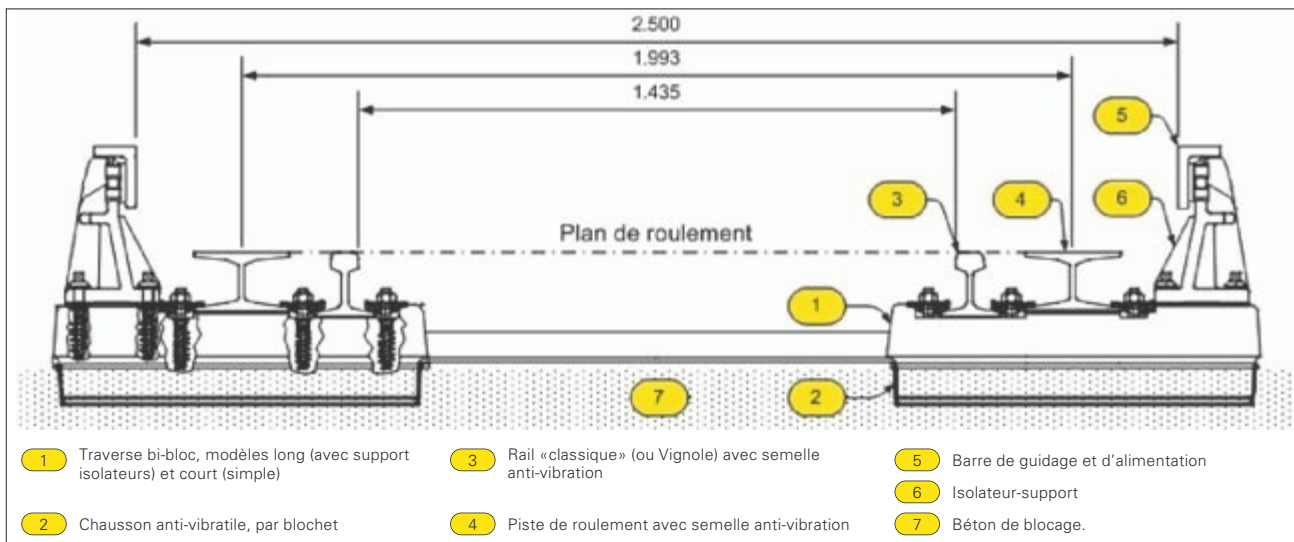
A noter qu'un soin tout particulier a été pris concernant la mise à terre et la protection contre les courants vagabonds (risque élevé de corrosion). Pour éviter que des courants électriques circulent dans les armatures et les corrodent, les tunnels sont divisés en tronçons d'environ 40 m isolés électriquement les uns des autres.

Sécurité

L'usager d'un métro sans conducteur doit se sentir en sécurité aussi bien dans les rames que lorsqu'il pénètre dans une station. Pour le m2, c'est d'abord le concept architectural des stations qui doit offrir des espaces lumineux et des chemins clairs vers l'air libre. On a ajouté à cela des équipements qui permettent à un opérateur du Poste de Contrôle Centralisé (PCC), situé dans le centre de Perrelet à Renens, de communiquer directement avec l'usager. C'est ainsi qu'un système d'interphone sera disponible sur les quais, intégré dans un «Help point» qui comprendra également un extincteur et un poussoir-feu pour déclencher une alarme incendie. Une pression sur le bouton d'appel de l'interphone mettra l'usager en contact avec l'opérateur, ce dernier recevant sur un écran l'image de la caméra la plus proche de la scène. D'autres caméras, réparties dans les stations, couvriront l'ensemble des espaces, permettant ainsi une surveillance ostensible des lieux.

Le sentiment de confiance dépend aussi de la clarté des informations à disposition de l'usager du métro. Les afficheurs placés au milieu des quais renseigneront sur la marche des trains, les temps d'attente pour les deux prochaines rames et les perturbations éventuelles. Un système de sonorisation des stations permettra à l'opérateur de diffuser des annonces vocales ou des messages pré-enregistrés par microphone, ainsi que de la musique d'ambiance. Les rames et les ascenseurs seront pourvus des mêmes fonctionnalités.

Le SCADA (Supervisor Control And Data Acquisition) permet de télécommander l'ouverture et la fermeture des portes des stations, l'allumage et l'extinction de l'éclairage, la diffusion des messages sur les afficheurs, la diffusion des annonces vocales préenregistrées, etc. Il surveille également les portes et les accès non autorisés au public, contrôle en permanence la bonne marche des nombreux équipements en relevant les alarmes techniques générées par ces derniers. Il permet donc à l'opérateur de se situer au centre du dispositif de sécurité des usagers du métro en lui offrant «des oreilles, des yeux et des bras» pour agir à distance. Les événements traités sont systématiquement répertoriés afin de conserver une trace de tout événement qui affecte le



6: *Éléments constitutifs de la voie pneumatique m2.*

6: *Die Konstruktionselemente der pneumatischen Geleiseanlagen der M2.*

fonctionnement normal du m2. Les conversations par interphone et les images de toutes les caméras sont également enregistrées, ces informations étant horodatées par un serveur de temps régulé par GPS.

Les façades de quai créent une barrière de sécurité entre les passagers situés sur le quai et l'ensemble voie-train. Une fois le train arrêté, les portes s'ouvrent et se ferment automatiquement, les mouvements des portes de quai et de celles des véhicules étant synchronisés par les automatismes. Les façades de quai présentent de nombreux avantages en matière de sécurité tant pour le client que pour l'exploitant (à titre indicatif: les intrusions (objets ou personnes) sur la voie causent 60 % des retards sur le réseau parisien). La sécurité en cas d'incendie en tunnel est aussi améliorée grâce à l'étanchéité aéraulique procurée par les façades. Les façades réduisent en outre le bruit dans les stations et améliorent le confort climatique, en réduisant les courants d'air et l'effet piston créés par l'entrée des trains en station. Il faut d'ailleurs noter que la quasi-totalité des métros ou navettes automatiques sont aujourd'hui équipés de portes palières. La fiabilité des façades se doit, en revanche, d'être très élevée, puisque la panne d'une des 168 portes du m2 engendrerait des perturbations très importantes au niveau du trafic.

En ce qui concerne le risque incendie, la configuration particulière du m2, notamment sa forte pente, influence de façon prépondérante la circulation des fumées en cas d'incendie dans un tunnel: plus de 900 scénarios possibles ont été simulés. Cette étude a abouti à l'installation de 56 turbo-ventilateurs dans les tunnels pour maîtriser la propagation des fumées. A noter que la conception anti-feu des rames (pas de matériaux inflammables) combinée à la sécurité donnée par le système d'automatisme permet de réduire considérablement le risque incendie. A noter aussi que les espaces publics et les locaux techniques sont équipés de détecteurs d'incendie automatique reliés au PCC. Des scénarios organisationnels ont été établis pour un engagement rapide et adéquat des forces d'intervention selon la situation.

Les études de sécurité ont pour objet de vérifier que les risques induits par la conception soient acceptables. De façon schématique, elles conduisent soit à imposer une exigence sur un composant (p. ex. pas de matériaux inflammables dans les trains), soit à ajouter des composants permettant de gérer le risque, en réduisant les conséquences d'un accident.

Planning et budget

Le planning général prévoit la mise en service du nouveau métro m2 à l'automne 2008. Le planning des travaux de gros-œuvre du projet est présenté ci-après. Ces travaux ont débuté au printemps 2004 quant à l'extension du tracé vers le nord sur le tronçon Flon-Croisettes. Ils se poursuivent actuellement simultanément sur une dizaine de chantiers. En ce qui concerne le tronçon Ouchy-Flon, les travaux ont démarré en janvier 2006, afin de conserver l'ancienne ligne m2 en service aussi longtemps que possible.

Les travaux de gros-œuvre de la ligne se sont terminés au début 2007 pour laisser la place aux chantiers de pose de la voie, puis aux phases d'installation et de tests des équipements électromécaniques (y compris essais et marche à blanc). A ce stade (début 2008), les principaux

jalons du planning de construction ont été respectés (malgré l'accident du tunnel Saint-Laurent). Ceci a été possible grâce à un engagement exemplaire des partenaires du projet. La phase de mise au point du système (longue phase d'essais pour garantir le respect des objectifs de sécurité et de performances) recèle encore des incertitudes, principalement à cause du retard du lot des automatismes.

Le budget du projet m2 s'élève à CHF 706 millions (indexation incluse). Un dépassement d'environ CHF 30 millions est prévu pour couvrir les risques du projet (coûts des nouvelles exigences de sécurité incendie, de certaines difficultés géologiques et de la part de l'accident du tunnel Saint-Laurent à charge du maître de l'ouvrage...). La part génie civil du budget est d'environ 50 % (dont les trois cinquièmes pour les tunnels) – celle de l'électromécanique étant d'environ 44 %. Le financement est assuré par la Confédération (28 %), le Canton de Vaud (58 %) et la Ville de Lausanne (14 %). La maîtrise d'ouvrage a été confiée à la société Métro Lausanne-Ouchy SA.

Les partenaires du projet

Une septantaine d'entreprises, de fournisseurs et de bureaux d'ingénieurs participent à sa réalisation. Le volet génie civil a été réalisé par une dizaine de consortiums d'entreprises de génie civil suisses du domaine des travaux souterrains et du génie civil. La fourniture du système de transport a été contractée «lot par lot» (plutôt que «clés en main») et assemblée dans une mission de systémier-intégrateur, assurée par le maître de l'ouvrage avec l'appui du principal fournisseur électromécanique. En ce qui concerne les partenaires institutionnels, il s'agit principalement de:

- l'Office fédéral des Transports qui assure la mission d'autorité de surveillance du projet;
- le Département des Infrastructures de l'Etat de Vaud qui a mené à bien la phase d'étude et d'approbation du projet et qui suit sa réalisation;
- les services de la Ville de Lausanne qui assurent l'interface entre le projet et l'environnement urbain dans lequel il s'implante;
- les Transports Publics de la Région Lausannoise qui exploitera le m2 et l'intégrera dans un nouveau réseau de transports publics desservant l'agglomération lausannoise. ■

Bibliographie

Cet article est basé sur les contributions de divers auteurs (A. Perret, M. Buthion, D. Joubert, E. Béhue, P. Cherki, J. Perret, P. Goy et F. Currat), dans les cahiers des revues SIA Tracé (n° 22 – novembre 2004 et n° 19 – octobre 2006) et Tec21 (juillet 2007) consacrés au projet m2. Des informations complémentaires peuvent être trouvées dans:

- M2 – eine vollautomatische Metro für Lausanne; M. Rellstab; Schweizer Eisenbahn-Revue; 12/2006.
- Lausanne M2 subway stays on track; F. Gaj, M. Badoux; Tunnels & Tunneling; September 2007.