

ÉNONCÉ THÉORIQUE MASTER ARCHITECTURE
-
MONTANDON INÈS

PROFESSEUR PHILIPPE THALMANN
MAÎTRE EPFL
EXPERT DANIEL DORSAZ

ANNÉE ACADÉMIQUE
2014 - 2015

EPFL ENAC ARCHITECTURE

LA CONSTRUCTIBILITÉ DU PROJET D'ARCHITECTURE SUR UN SITE CONTRAIGNANT

Le cas du projet de la passerelle pour la gare de Renens



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le bureau Farra & Zoumboulakis architectes et tout particulièrement M.Colomb Emmanuel pour les renseignements fournis concernant le projet Rayon Vert. Ainsi que mon professeur d'énoncé Philippe Thalmann pour son implication et mon maître EPFL Sebastian Duque Mahecha pour sa participation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	5
INTRODUCTION	8
PROBLÉMATIQUE	8
CAS D'ÉTUDE	11
CHOIX DU SITE	11
Intérêt par rapport à la problématique	11
Le contexte du projet	11
LE PROJET DE PASSERELLE	12
Un nouveau centre pour l'ouest	12
Un espace urbain sur des voies de train	12
Le concours : Interface des transports publics	17
Les études de 2008-2009	17
L'avant-projet de 2009	20
Le projet de construction	25
CRITÈRES DE PLANIFICATION	26
COÛTS	26
Coûts de construction	26
Cycle de vie budgétaire	29
QUALITÉ	30
Retour d'expérience	30
Forme et fonction	30

DÉLAIS	33
Planning de documentation	33
Planning général	34
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	34
Matériaux de construction	34
Énergie de réalisation et d'exploitation	36
Cycle de vie	37
Le chantier et son environnement	37
RISQUES	39
CHANTIER	40
PLANIFICATION	40
Les choix constructifs	40
ORGANISATION DE CHANTIER	44
NUISANCES	44
SÉCURITÉ	45
Réglementation des CFF	45
SYNTHÈSE	49
LE PROJET EN SUBSTANCE	49
LA CONCEPTION	49
RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE	50
Ouvrages	50
Sitographie	50
Fichiers téléchargés	51
Iconographie	52

INTRODUCTION

Cet énoncé théorique a pour but de préparer le travail de mon projet de master. J'ai choisi d'avoir une approche très constructive dans mon travail avec une volonté d'aborder l'architecture dans son ensemble en vue de l'élaboration d'un projet qui va être construit, avec tout ce que cela implique. Ma problématique s'inscrit dans cette démarche et propose de s'appuyer sur un cas d'étude où la notion de constructibilité est importante.

PROBLÉMATIQUE

La principale question posée ici est : Quels aspects de la mise en œuvre du projet et des contraintes liées au site, peuvent avoir des conséquences en amont sur la démarche conceptuelle du projet architectural.

Le thème sous-jacent étant l'analyse des différents aspects de la construction en lien avec la problématique posée : Concevoir le projet d'architecture en pensant à sa constructibilité dans un site contraignant. Penser à la constructibilité du projet implique de savoir quels sont les phases d'un projet avant d'en arriver à la mise en œuvre. Le but est de pouvoir faire un retour en arrière sur l'historique du projet, sur les choix architecturaux et constructifs et sur des critères de planification précis pour avoir une autre approche du projet.

On se concentrera principalement sur la partie mise en œuvre qui implique des choix de techniques constructives et l'anticipation des contraintes. Ces contraintes sont importantes dans l'étape de design du projet. En effet cette problématique va me permettre d'avoir une vue d'ensemble théorique sur les différentes étapes de la vie d'un bâtiment avant de passer à l'application au projet.

Le choix d'un site contraignant suit la même logique. Si le but est d'identifier les contraintes qui vont déterminer certains aspects du projet, alors le choix d'un site particulièrement contraignant est approprié. Il s'agit, on le verra plus tard, d'une infrastructure urbaine.

La démarche adoptée dans l'énoncé consiste à analyser un cas d'étude suivant des critères de planification qui serviront ensuite de base pour mon projet de master, comme critère de design. Le but étant de reprendre le cas d'étude pour en faire un projet revisité suivant de nouveaux critères et avec une bonne connaissance de son historique.

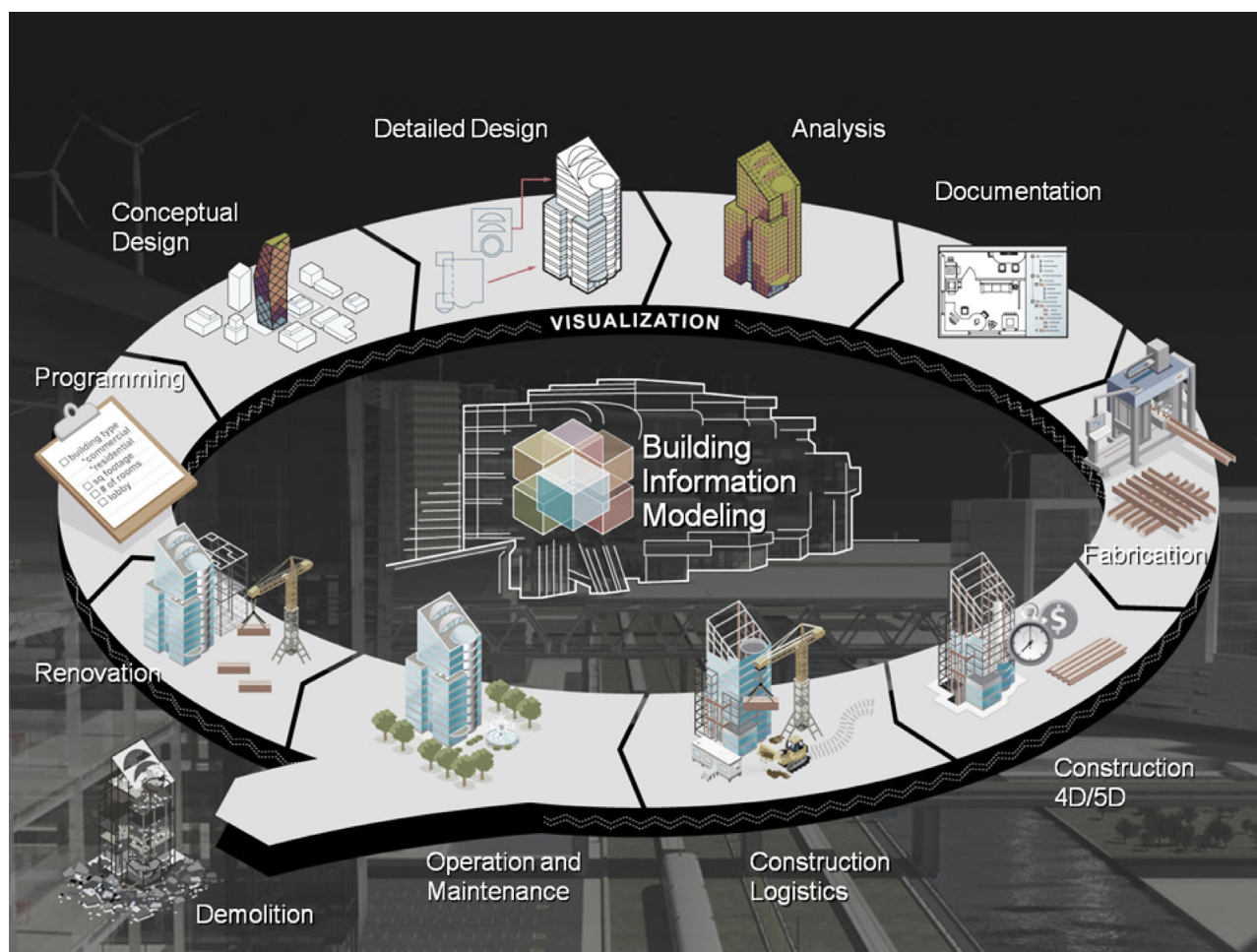
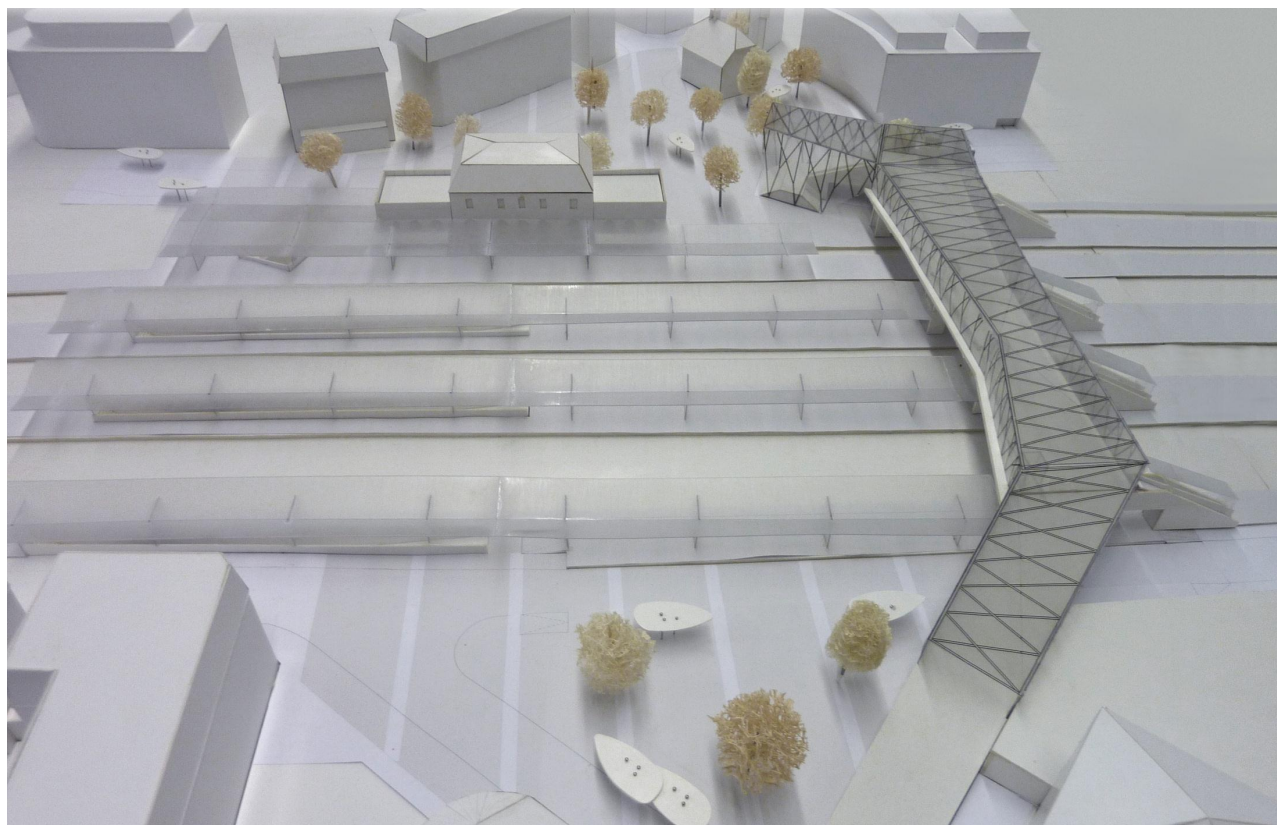
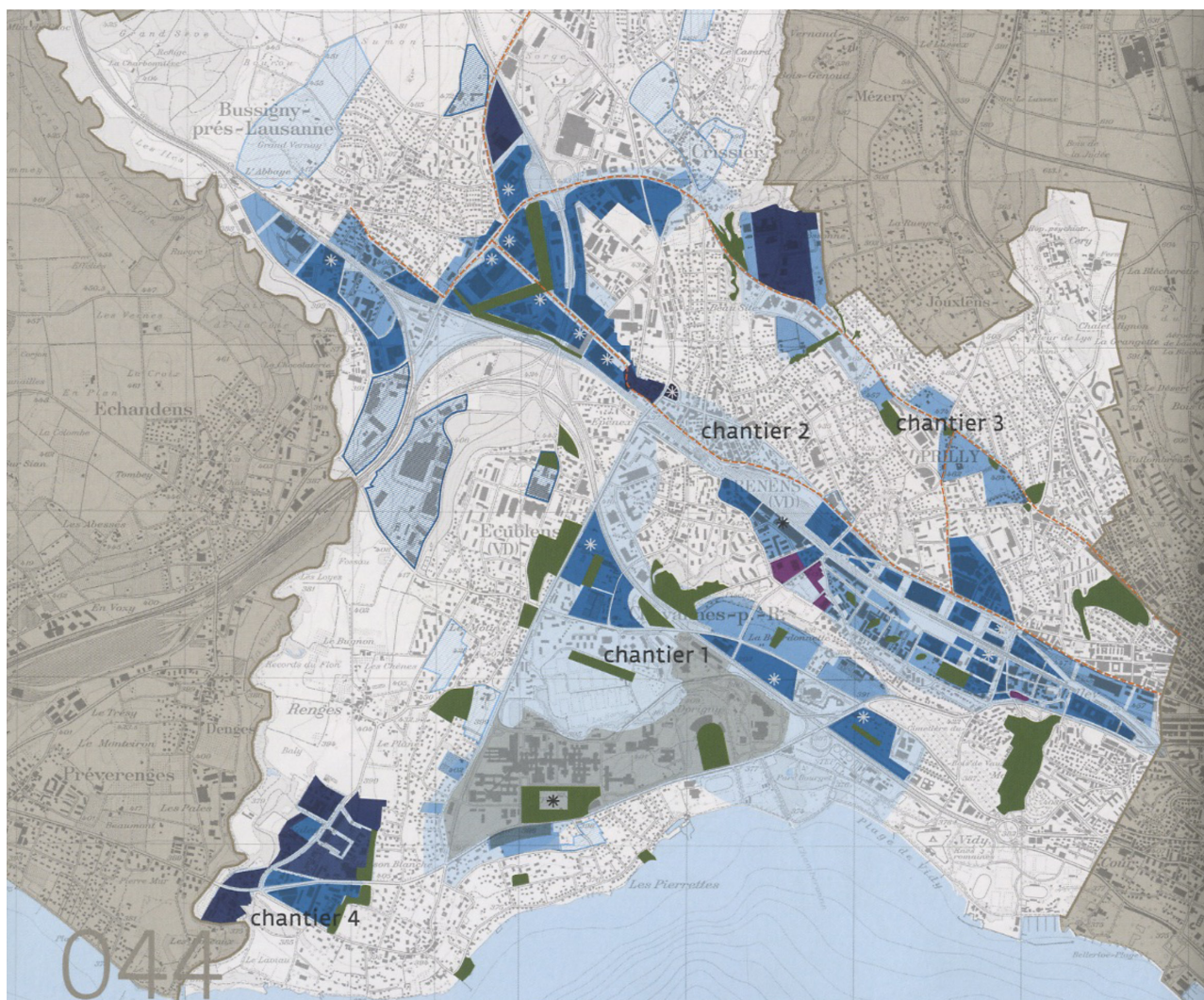


Schéma logique BIM



Vue de la maquette projet de passerelle Rayon Vert, gare de Renens



Vue de la passerelle depuis la place au sud, version du projet de 2013, Renens gare

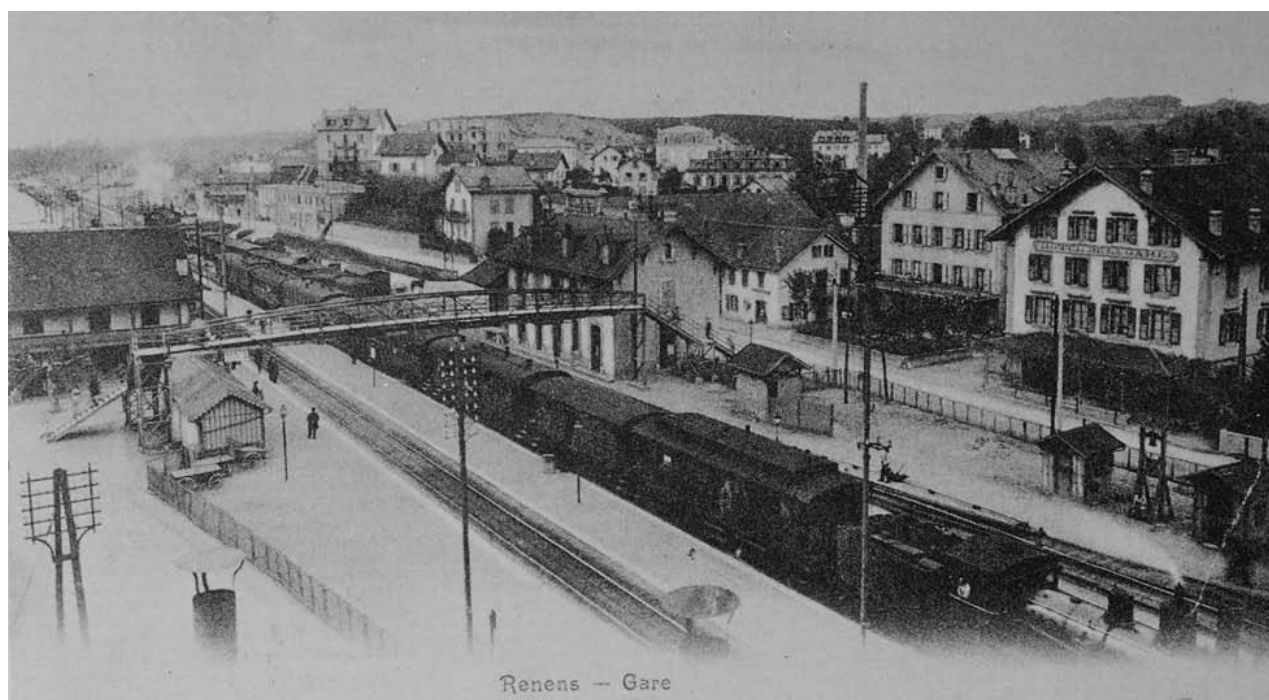


Photo d'archive 19ème siècle, vue de la gare de Renens

CAS D'ÉTUDE

CHOIX DU SITE

Intérêt par rapport à la problématique

Le choix du terrain doit respecter la problématique : « Concevoir le projet d'architecture en pensant à sa constructibilité dans un site contraignant ». J'ai donc choisi de travailler dans un contexte urbain de moyenne et forte densité avec si possible de grandes infrastructures urbaines, ce qui rend le site plus contraignant.

Le cas de la construction proche d'une gare ou par dessus les voies de train apparaît comme le meilleur choix tant au niveau des contraintes d'accès que de la difficulté supplémentaire liée au trafic ferroviaire.

Comme mon analyse ne porte pas spécifiquement sur une ville ou une agglomération précise, j'ai choisi de rester dans le cadre de la région de Lausanne. C'est un contexte métropolitain bien connu et proche, dont la plus part des acteurs sont de la région (architectes, entreprises générales, fournisseurs, experts...).

Cette zone offre beaucoup de possibilités et il y a plusieurs gares intéressantes dans des zones urbaines denses.

Le contexte du projet

J'ai choisi la gare de Renens car elle fait partie d'un projet plus étendu visant à développer l'ouest de Lausanne, sur la base du schéma directeur de l'Ouest Lausannois qui regroupe quatre grands chantiers d'études dont celui du secteur Bussigny à Sébeillon avec un projet spécifique pour cette gare. Ce projet d'urbanisme a fait l'objet d'un concours en 2007 par les CFF, le projet lauréat « Rayon vert » du bureau Farra & Fazan propose de jeter une nouvelle passerelle par-dessus les voies, de repenser les places nord et sud et prévoit un espace pour le passage du tramway.

Le concours pour une nouvelle interface des transports publics pour la gare de Renens s'inscrit dans une histoire ferroviaire qui remonte au 19ème siècle.

L'établissement d'une simple station de rebroussement entre Yverdon et Morges en 1855 au milieu des champs mènera ensuite au développement d'une nouvelle centralité déconnectée des noyaux villageois existants. En effet la petite station devient la gare de triage de Lausanne en 1877. Elle est véritablement à l'origine du développement urbain de Renens, avec le nombreux personnel qui y travaille, tout un quartier se développe le long des voies. Cette importance urbaine historique de la gare sera forcément très présente dans la proposition de projet pour une interface des transports publics. Le développement de la gare a toujours été le moteur urbain de Renens et la solution à ses problèmes de transport, à l'image du tramway qui reliait autrefois Renens et Lausanne désaffecté en 1964. Aujourd'hui la gare de Renens constitue le nœud principal d'un réseau de transports publics à l'échelle de l'Ouest Lausannois, au carrefour de quatre communes : Chavannes-près-Renens, Crisier, Écublens, et Renens; qui sont également les maîtres d'ouvrage pour le projet d'aménagement de la gare avec les CFF et les tl.

LE PROJET DE PASSERELLE

Le projet de passerelle pour la gare de Renens doit relever le défi de réunir la « Ville » autour de la gare en reconnectant le nord et le sud, actuellement coupée par les voies de train. Cette gare constitue également un axe fort de transports publics et la future passerelle sera un point de passage privilégié pour tous les voyageurs. Les contraintes sont donc nombreuses pour arriver à proposer un véritable espace public qui soit à la fois un franchissement des voies CFF et un accès agréable aux quais pour les voyageurs. Dans cette partie on présentera tout d'abord le contexte du site choisi, puis le concours qui est à l'origine du projet que l'on va étudier, enfin il sera question des différentes études, de l'avant projet et du projet de construction qui est actuellement en phase de développement par le bureau FARRA & FAZAN Architectes.

Un nouveau centre pour l'ouest

La volonté du Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois est de requalifier le secteur de la gare de Renens pour en faire un réel centre urbain. Ce n'est aujourd'hui qu'une ébauche dans le développement urbain, même si la gare a déjà un rôle important comme interface des transports pour la ville, le but est d'affirmer la centralité et sa visibilité.

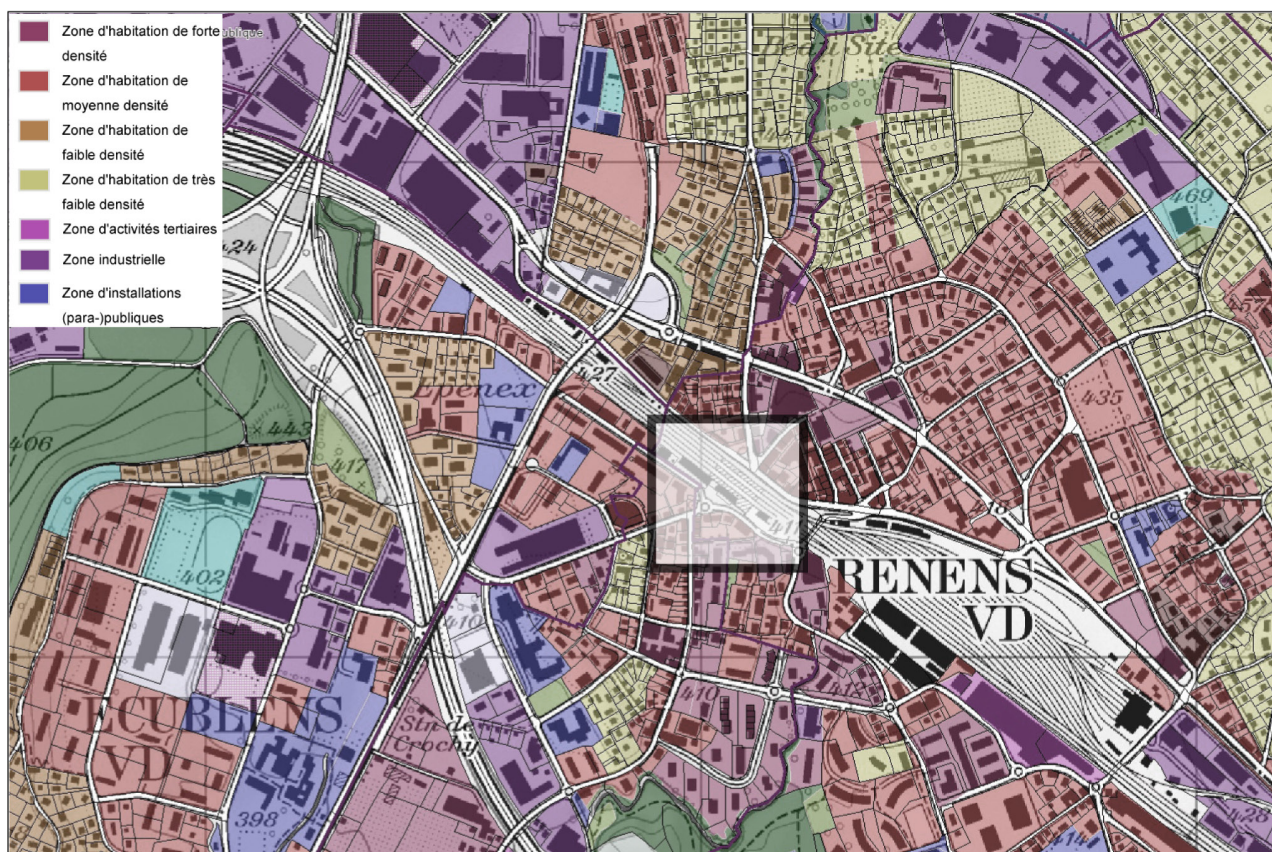
Le site du projet se situe donc dans une configuration urbaine de centralité, avec du bâti de moyenne et forte densité, des zones d'activités industrielles et tertiaires, des installations parapubliques et des commerces. Aux abords directs de la gare les affectations sont mixtes entre habitats et activités économiques, avec une urbanisation classique par alignement de façades et rez-de-chaussée publics.

Cette forte mixité fonctionnelle rend le site plus difficile car cette mixité s'accompagne d'un flux de véhicule, de circulation de vélos et de piétons, concentrés au niveau de la gare. (voir la carte des zones d'affectations ci-contre) Les quartiers riverains de cette nouvelle interface de transports publics font également partie d'un plan de requalification et de densification, avec plusieurs plans de quartier en cours de développement (Plans de quartiers Les Ramiers, Plan Léman, Place du Marché, Simplon).

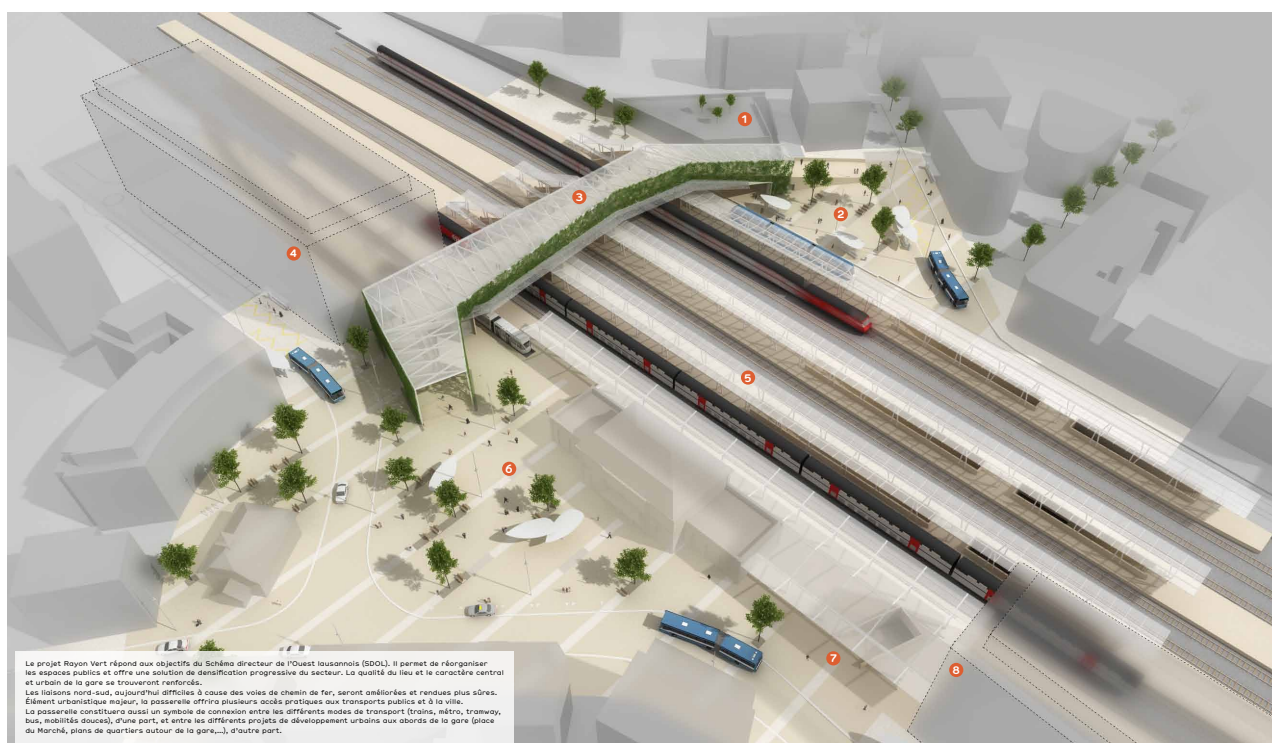
L'accès au site se fait au nord par les rues du Terminus et de Crissier, et au sud par l'avenue du Tir-Fédéral qui sont très fréquentées car se sont les accès principaux au centre ville, les autres rues sont à priori trop petites pour le passage des camions et des grues. Par contre d'après le plan des limites des traversées en localités pour Renens (voir site du Canton de Vaud), la rue du Terminus est à privilégier comme accès principal au site, ce qui on le verra par la suite pose un problème pour l'organisation prévue du chantier. De plus l'analyse de la carte des zones d'affectations au 10 000ème permet d'avoir une vue d'ensemble des avoisinants du site, et on remarque qu'il y a des quartiers de villas à faible densité proche du centre. Ce qui pose la question des nuisances dues au chantier qui sont moins tolérées en zone résidentielle, notamment avec le trafic des camions et des engins de chantier.

Un espace urbain sur des voies de train

La principale caractéristique du projet de passerelle proposé par les architectes FARRA & FAZAN, que l'on va détailler par la suite, est de proposer un espace urbain superposé à une installation ferroviaire. Tous les participants du concours devaient traiter cette problématique du franchissement des voies de train, alors on peut se demander quelles sont les caractéristiques d'une telle situation



Carte des zones d'affectations du secteur de la gare de Renens, 10 000 ème



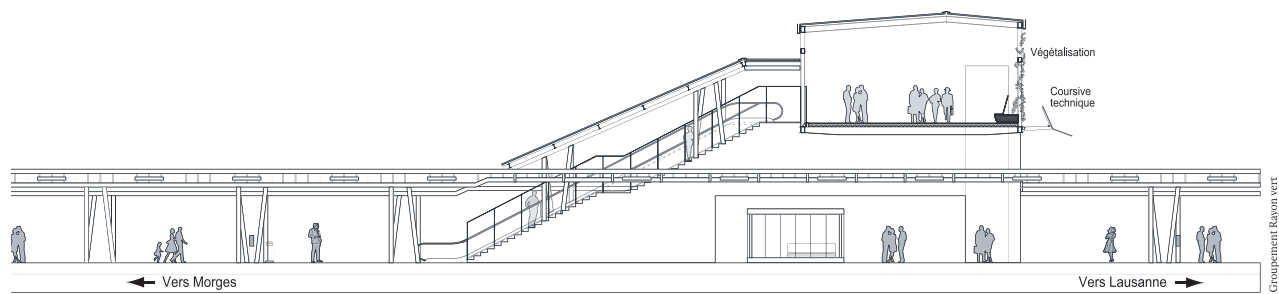
Vision d'ensemble du projet Interface des transports publics, Renens Gare

- | | |
|----------------------------|---|
| 1. Nouveau parking 2 roues | 5. Infrastructures CFF |
| 2. Aménagement place nord | 6. Aménagement place sud |
| 3. Passerelle | 7. Remplacement du passage inférieur existant |
| 4. Nouveau bâtiment ouest | 8. Bâtiment est |





Plan du projet Rayon Vert, phase de concours 1er prix



Vue de la passerelle en coupe, avec l'accès au quai version du projet de 2013, Renens gare

Figure 6 : Principales relations journalières - valeurs absolues estimées

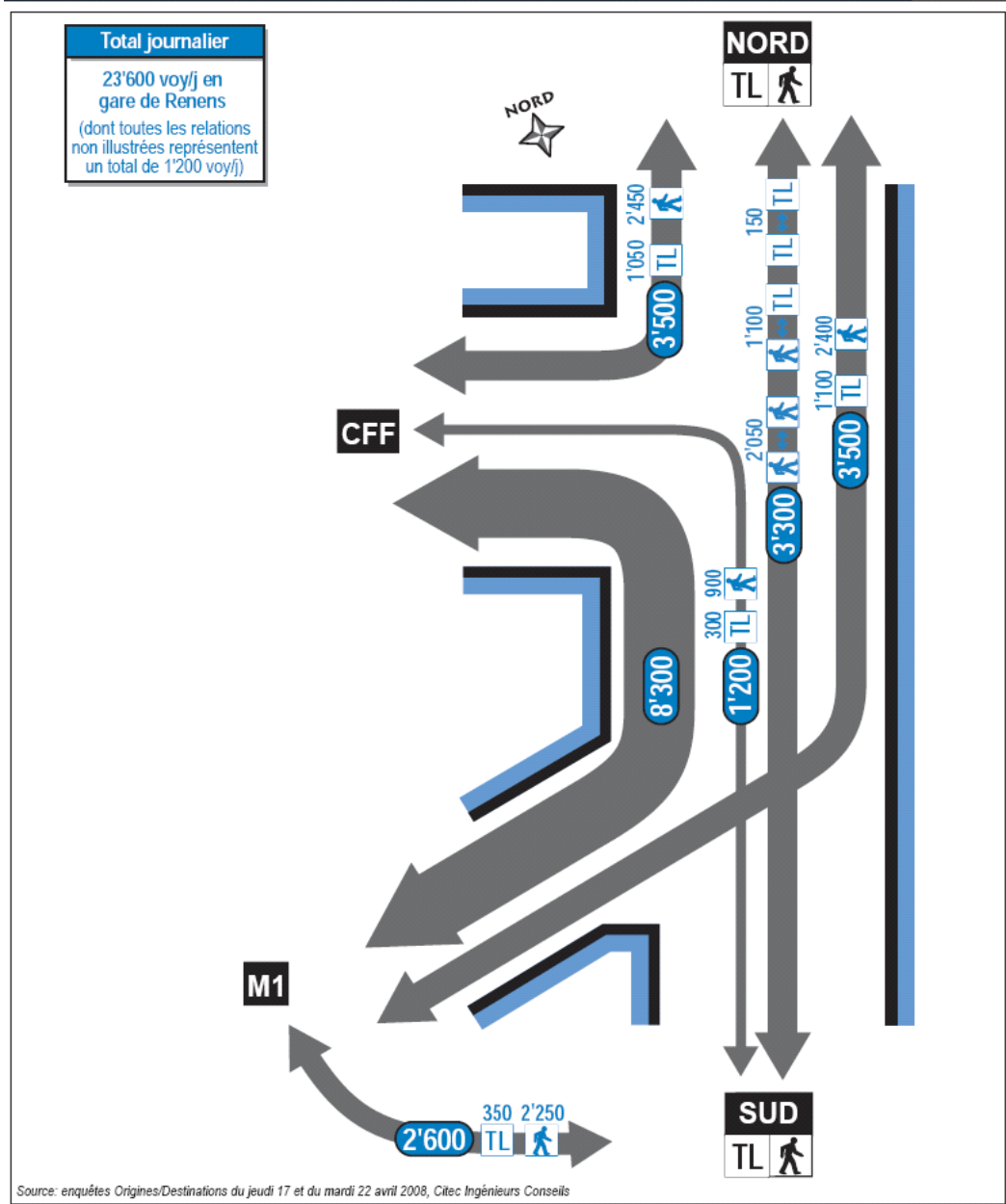


Fig. 15: L'analyse des principales relations journalières - valeurs absolues estimées - fait apparaître l'importance de l'échange entre les CFF et le m1 (extrait de l'étude Etude sur le flux des voyageurs Organisation de l'interface: principes fonctionnels et de circulation, CITEC, juin 2008).

vis-à-vis de l'activité de la gare. La principale différence avec un projet en ville classique est le flux de voyageurs à gérer qui n'est pas constant. Ensuite il y a la dimension d'interface de transports publics, car tous les voyageurs qui transitent par la gare vont en général rejoindre un autre type de transport (vélo, bus, métro, voiture, etc.) ou bien vont monter dans un train, et doivent donc dans tout les cas respecter un horaire ce qui en fait la principale contrainte du projet. L'actuel surencombrement des accès aux voies de la gare de Renens aux heures de pointe est la preuve que cet aspect est très important. D'autant plus qu'il s'agit d'un axe fort de transport, mis en avant par le schéma directeur et, on va voir par la suite que le programme du concours, qui découle de tous ces problèmes d'accessibilités, va aussi dans ce sens. En effet c'est à la suite d'une première étude pour agrandir le passage sous voie existant, que la nécessité d'une prise en compte plus globale des problèmes à l'échelle de la gare est apparue, alors suivi d'un concours en 2007.

Le concours : Interface des transports publics

Le programme du concours pour l'aménagement du secteur de la gare de Renens en 2007, demande aux participants en plus des aménagements des places nord et sud, de prévoir un « nouveau franchissement nord-sud avec rampes et escaliers d'accès aux quais et extrémités, à l'ouest de l'actuel. » (Bureau du Sdol, Rapport du jury du concours, 2007, p. 15). Le programme précise également qu'il faut réussir à conférer un sentiment d'unité au lieu, garantir entre tous les modes de transports une clarté des cheminements, proposer une ambiance sécurisante au sein de la gare et une lisibilité immédiate de l'organisation fonctionnelle pour les utilisateurs.

Le projet « Rayon vert » prend alors le parti de proposer un franchissement aérien, proposant ainsi un objet symbolique bien visible dans le paysage urbain. La passerelle n'est plus seulement l'expression d'un usage mais la matérialisation de l'unification des deux parties du centre ville de Renens, jusque là coupées par cette énorme infrastructure qu'est la gare.

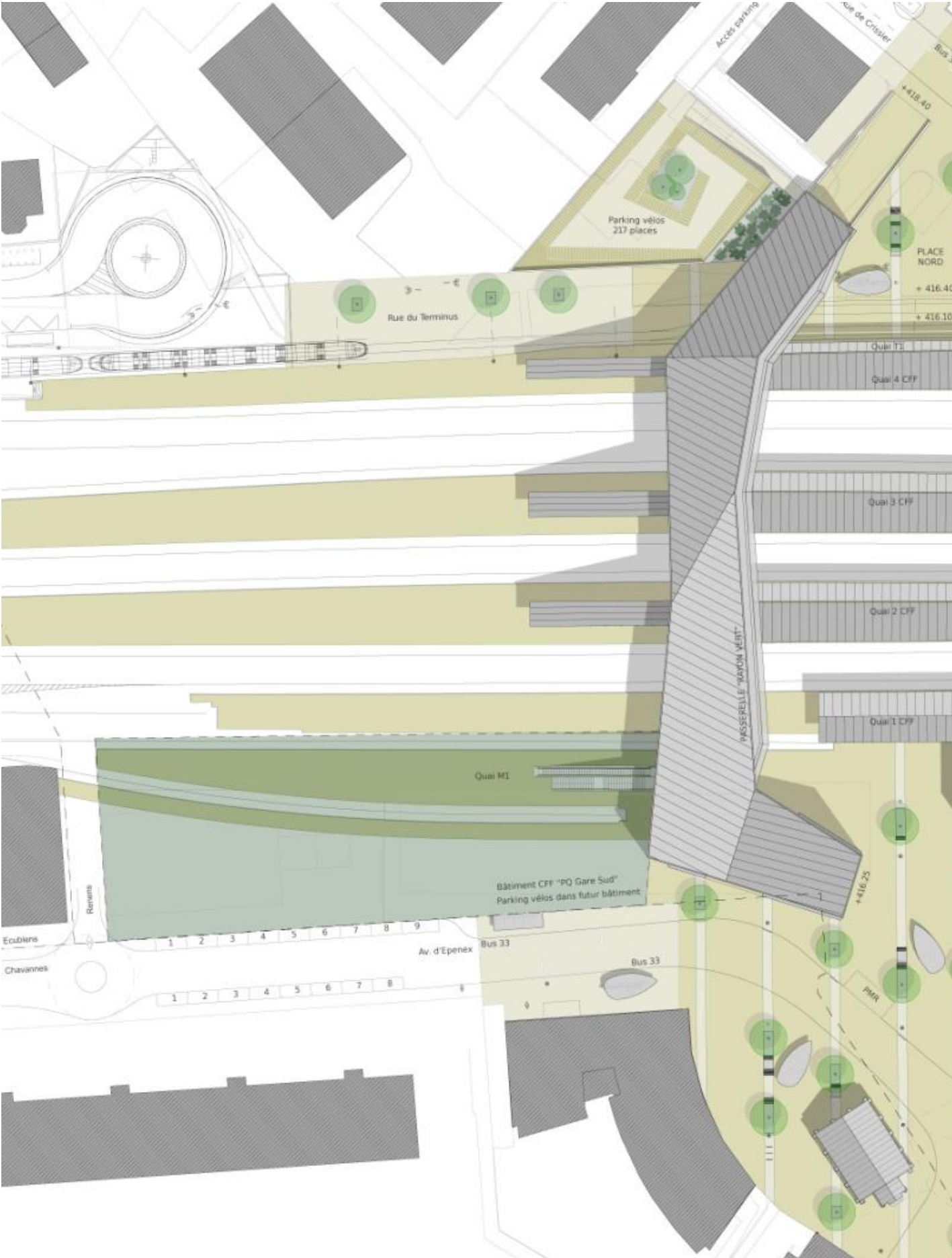
Le rôle d'articulation urbaine de la passerelle se retrouve dans ses aspects les plus techniques, en effet même au stade du concours, son dimensionnement et par conséquent sa forme par extension, sont intimement liés au passage des cycles et piétons qui la traversent. L'étude des flux qui a été ensuite menée par les CFF, a permis de modéliser plus précisément la forme dans les étapes suivantes du projet pour une optimisation de l'utilisation de l'espace.

On comprend alors que le parti pris d'une passerelle, implique un réel parcours avec ses points de vue et son espace public visible, en lien direct avec les places. Le jury a estimé que l'inconvénient pour les passagers des trains de rallonger leurs parcours, par rapport à une solution souterraine, était compensé par cette qualité urbaine.

Un des aspects important du projet est donc cette prise de hauteur assumée qui offre un nouveau niveau de lecture aux habitants et aux voyageurs sur la gare et la ville comme un prolongement des places qu'elle connecte. Dans ce sens la passerelle est ouverte d'un côté et propose des bancs et de la végétation grimpante sur une des parois. Le jury a alors émis des doutes concernant la sécurité d'une telle végétalisation par dessus des voies ferrées, même si la plus value apportée au site de la gare nuance le problème. Ce rideau de verdure a été conservé par la suite dans l'évolution du projet malgré les problèmes techniques. Selon le rapport du jury, il apporte « une fraîcheur bienvenue à travers l'univers minéral des CFF » (Bureau du Sdol, Rapport du jury du concours, 2007, p. 26).

Les études de 2008-2009

La proposition d'une passerelle a conduit les CFF en 2008 à mener une étude plus approfondie des flux de voyageurs dans la gare dans le cadre de l'étude préliminaire, visant à vérifier la compatibilité





Plan du projet Rayon Vert, version du projet de 2012
19

du projet avec les besoins des divers intervenants (TL, CFF infrastructure, CFF immobilier). Pour optimiser le projet, il a fallu anticiper l'augmentation de la fréquentation de la gare avec le développement de l'offre ferroviaire d'ici 2020 et l'augmentation du nombre d'emploi et d'habitant. En effet la mise en place entre 2010 et 2020 d'un réseau express régional (RER) et le développement de l'offre du trafic grandes lignes (IC, ICN, IR, et RE) va participer à augmenter le nombre de voyageurs. La gare de Renens devrait ainsi devenir la troisième plus importante de Suisse Romande, avec environ 27 500 voyageurs par jour auquel s'ajoute 20% de transit de piétons à travers la gare.

Au moment de l'étude de 2008 le nombre de personnes transitant par la gare s'élevait à 23 600 voyageurs par jour (voir le détail de la répartition dans le schéma ci-contre).

Le projet a également intégré les chiffres du PALM (Projet d'Agglomération Lausanne-Morges) qui prévoyait une augmentation de fréquentation de 40% (extrait de l'étude : Étude sur le flux des voyageurs Organisation de l'interface : principes fonctionnels et de circulation, CITEC, juin 2008) soit un total d'environ 33 000 voyageurs.

L'étude de contexte réalisée en 2009 par le groupement Rayon Vert a permis de mettre en évidence les enjeux urbanistiques du projet qui affectent principalement l'aménagement des places mais aussi dans une certaine mesure la passerelle. Cette étude développe une analyse territoriale qui prend en compte, à l'échelle de l'Ouest Lausannois, la topographie, la structure du paysage, les fronts bâtis, les liens entre infrastructure et paysage, les parcours piétons et cyclistes planifiés ainsi que les différents types d'urbanisation. Cette étude met en évidence la nécessité d'entreprendre une étude de mobilité et de requalification du quartier de Renens au sud des voies CFF.

L'avant-projet de 2009

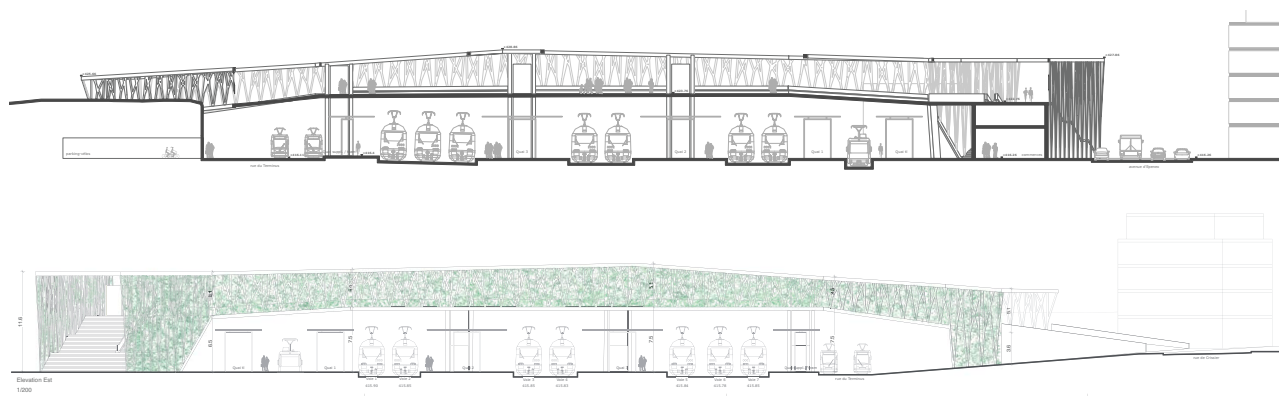
Le projet de passerelle on l'a vu s'inscrit dans un projet plus large d'aménagement du secteur de la gare de Renens, ce qui implique une organisation coordonnée des différentes parties du projet pour pouvoir atteindre les objectifs fixés lors du concours. Pour cela une organisation sous forme de lots a été mise en place, chaque lot étant lié au maître d'ouvrage correspondant, le tout piloté par un groupe décisionnel et un groupe technique. La passerelle fait partie du lot n°3 : domaine public et communes, qui englobe :

- La place de la Gare Nord
- La place de la Gare Sud
- Une partie des rues du Terminus et de Lausanne
- Une partie de l'avenue d'Epenex
- La rue rejoignant la place de la Gare Sud au passage du 1er Août
- La rue du Tir-Fédéral jusqu'au rond-point des Glycines y compris
- La passerelle.

La coordination avec les autres lots implique par exemple que le positionnement des appuis de la passerelle dépend du développement du lot 1 : aménagement des infrastructures ferroviaires (voir schéma aménagement des infrastructures ferroviaires ci-contre). En effet le projet prévoit l'élargissement (le quai central passe de 4,50 m à 9 m) et le prolongement des quais, ainsi que la création d'un nouveau quai de 220 m de long au nord le long de la voie 7, qui servira également d'interface pour le nouveau tram Renens - Lausanne, qui ne fait pas partie du même projet.

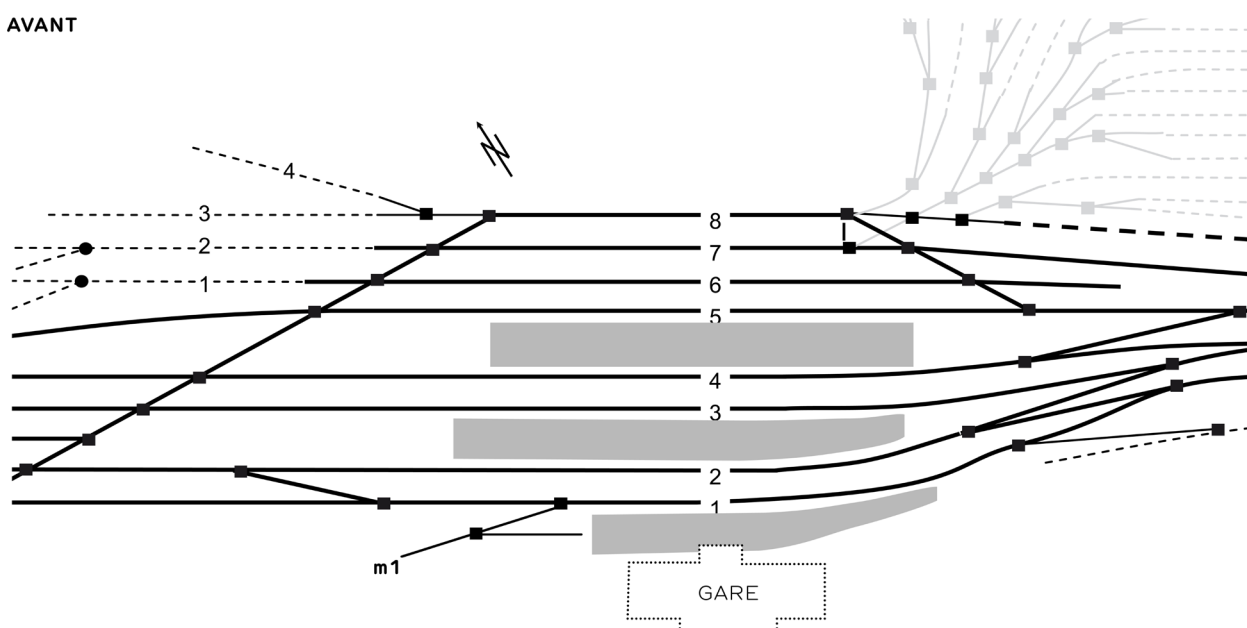
Le projet prévoit aussi l'aménagement des infrastructures des tl - m1 (lot 4) pour améliorer l'embarquement des voyageurs et l'accès au quai depuis la place sud. En repositionnant et en agrandissant le quai, le projet vise également à assurer un accès direct à la passerelle, ce qui impacte sur la forme et le positionnement de l'accroche sud de la passerelle.

La coordination avec les autres parties du projet a permis au groupement Rayon Vert de clarifier le



Coupes transversale et Élévation Est de la passerelle phase d'avant-projet

AVANT



APRÈS

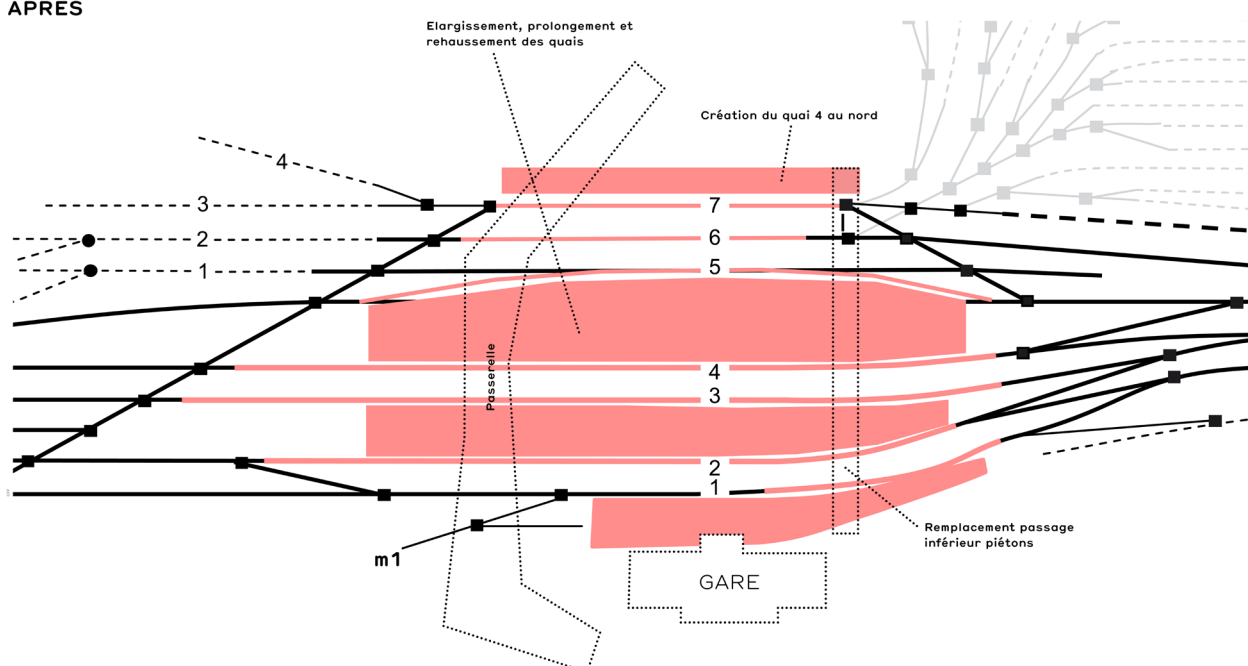
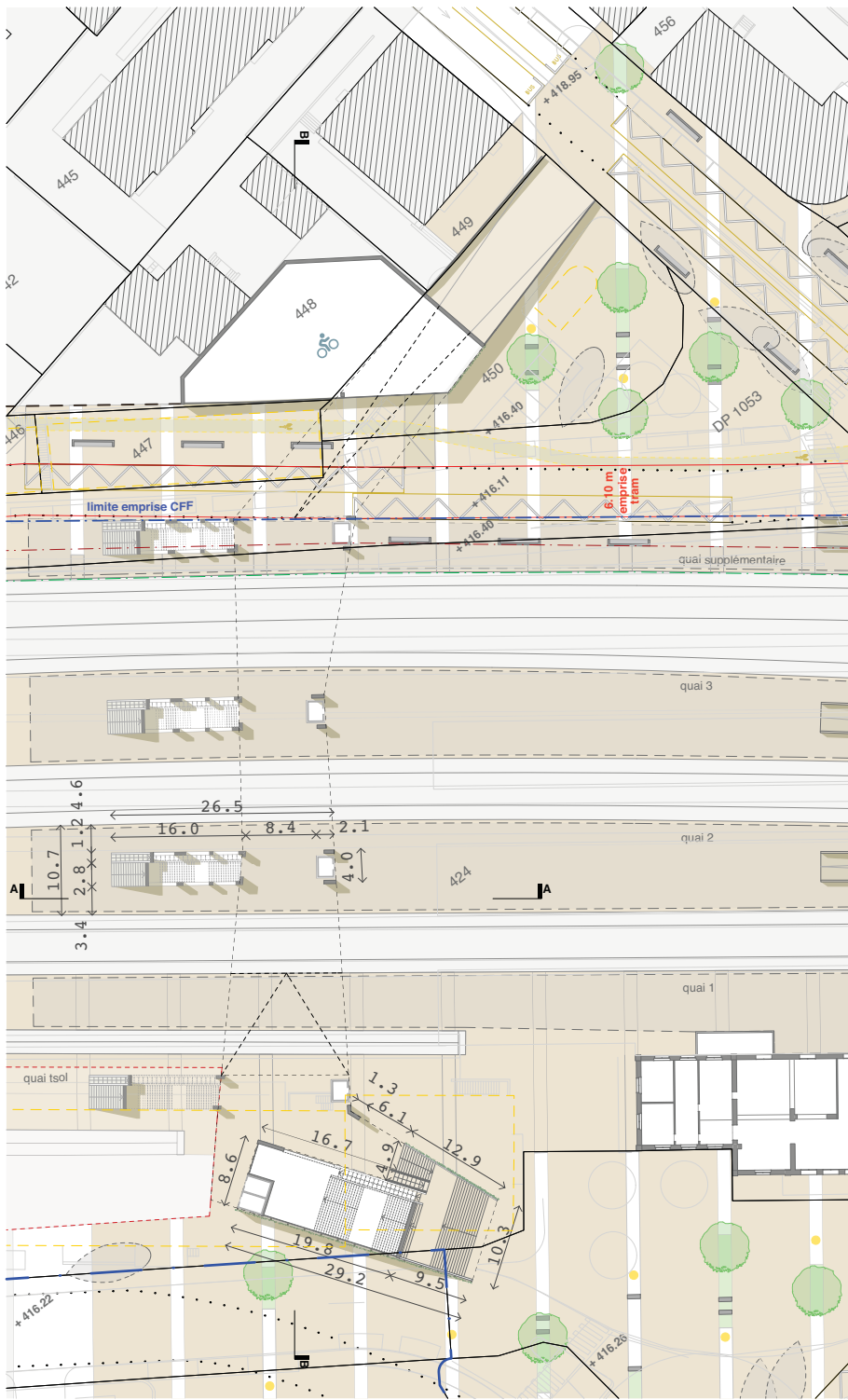
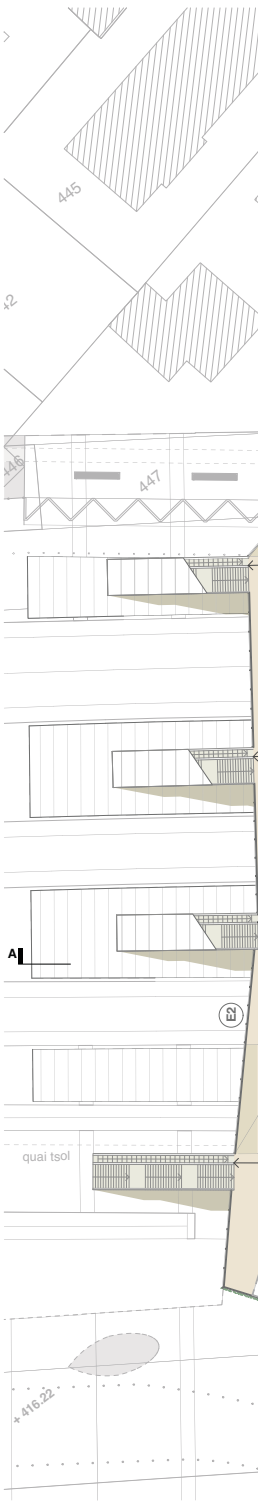


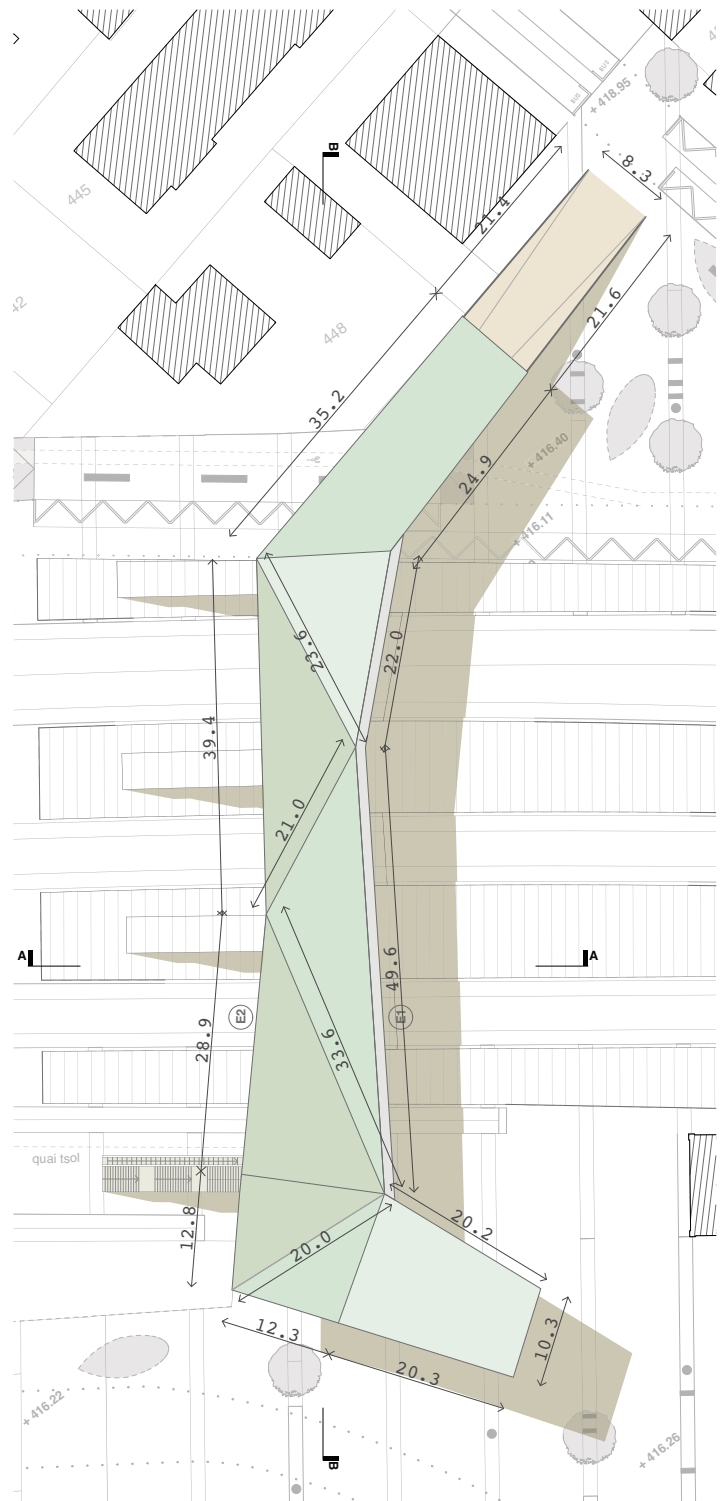
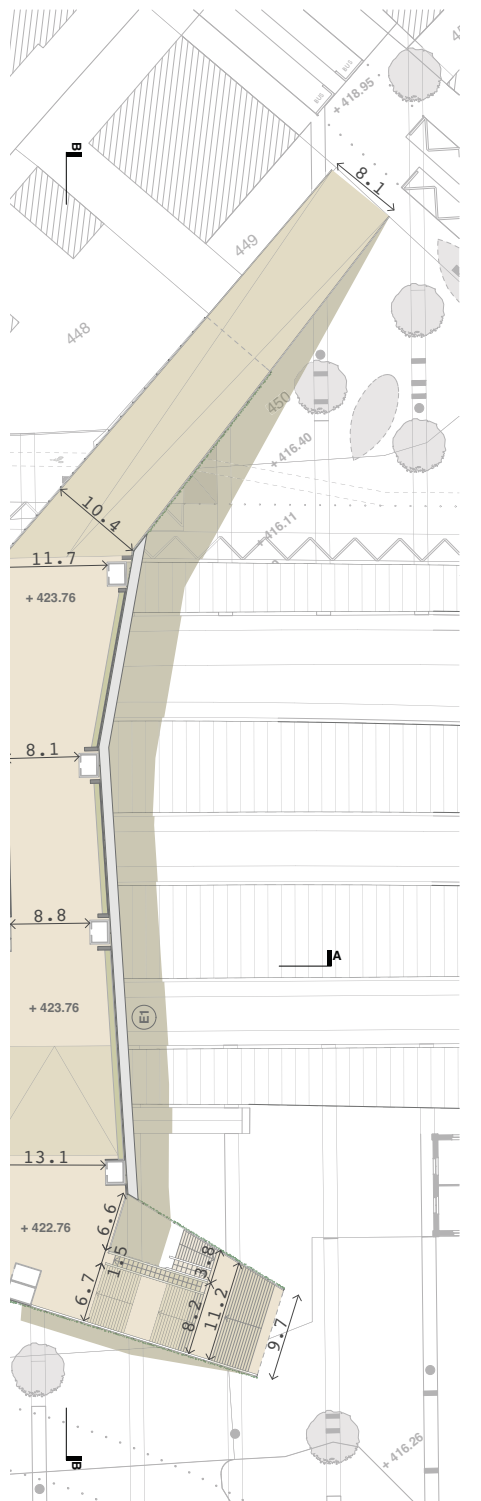
Schéma aménagement des infrastructures ferroviaires des CFF



niveau : rez-de-chaussée
1/500



niveau : premier
1/500



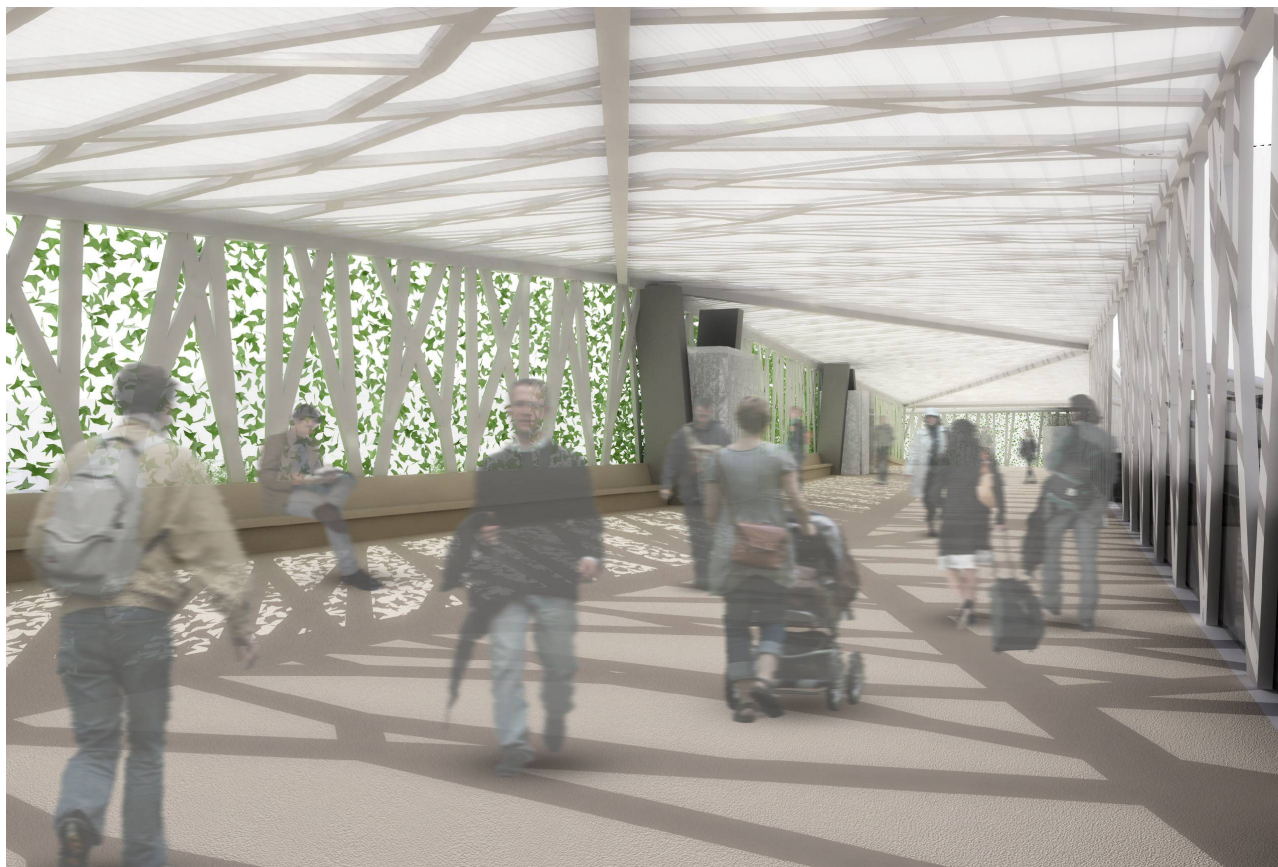
niveau : deuxième
1/500

Plan des niveaux de la passerelle, phase d'avant-projet



Groupement Rayon vert

Vue de la passerelle depuis la place au sud, version du projet de 2013, Renens gare



Vue de l'espace intérieur passerelle, version du projet de 2013, Renens gare

dimensionnement et le fonctionnement de la passerelle. Il apparaît que l'accès Nord doit comporter des escaliers de minimum 5,20 m de large, que les accès aux quais doivent être équipés d'un escalator et d'un escalier large de 2,50 m, que la largeur de la passerelle au niveau des accès aux quais doit varier suivant l'étude des flux des CFF entre 8,50 m et 15 m (accès à la place Sud).

Le détail du dimensionnement de la passerelle est plus visible dans les plans des niveaux p. 22 - 23, extrait du dossier de plans de l'avant-projet.

L'étude statique à ce stade du projet a permis aux architectes de confirmer le choix de la technique constructive développée lors des études préliminaires, qui est un treillis métallique arboriforme constitué de profilés soudés de 150 mm par 100 mm. La structure se poursuit en toiture avec une protection en polycarbonate, cette évolution donne plus de légèreté et de transparence à la structure.

Le projet de construction

Le choix du principe constructif pour la passerelle est très conditionné par les conditions du site et par la coordination avec les autres chantiers, mais il y a aussi le manque de place pour les zones de chantier qui a poussé l'équipe du projet à choisir une solution partiellement préfabriquée. Le but est de gagner de la place en livrant des pans de la structure, parois ou toiture, par camions.

Cette structure est ensuite assemblée par tranchée sur la zone d'assemblage du chantier (voir détail dans la partie gestion de chantier) puis les tronçons sont posés à l'aide de la grue sur leurs appuis définitifs. Le sol est également monté par travée avec des tôles nervurées puis posé sur les appuis et bétonné sur place. Le but de cette technique est d'éviter la construction d'étais ou de structures provisoires, ce qui est impossible à cause du passage des trains.

Les appuis de la passerelle seront réalisés en béton coulé sur place en même temps que les travaux d'agrandissement des quais. Ce choix constructif implique que chacune des deux lames de béton qui constituent une pile doivent être coulées en même temps que les CFF réalisent la moitié de quai correspondante. Les nouveaux quais sont réalisés par moitié pour assurer l'accès aux trains des voyageurs pendant la durée des travaux et limiter le nombre de trains supprimés sur l'ensemble du réseau.

Le problème avec cette solution s'est qu'il faut beaucoup plus sécuriser le chantier car les quais ne sont pas larges et il faut prévoir un passage libre de minimum 3 m pour que le public circule, juste au contact du chantier.

Un autre point fort du projet Rayon Vert était la végétalisation de la façade Est que les architectes ont choisie de conserver malgré les problèmes de conception et de mise en œuvre que cela implique. En effet il a fallu créer une coursive protégée pour l'entretien des plantes, qui soit sécurisée contre le risque d'arcs électriques dû aux lignes électriques des trains. Développer un filet métallique spécial qui puisse être isolé électriquement, serve de garde corps et de support pour le lierre. La façade Ouest elle est ouverte avec un garde corps en verre sécurit de 1,80 m de haut, là aussi pour éviter les arcs électriques.

Le projet de construction est fortement marqué par les contraintes de sécurité dues au contexte de la gare, pour éviter certaines de ces contraintes, il aurait fallu surélever la passerelle mais cela n'est pas envisageable car ça rallonge trop les temps de parcours et complique fortement les accès, par exemple la longueur des escaliers. Le projet doit faire un compromis entre les contraintes de sécurité et les contraintes fonctionnelles.

Maintenant que l'on a fait un rappel chronologique de l'évolution du projet, les différents éléments spécifiques qui le composent vont être mis en relation avec les principaux critères de planification. En se basant sur la littérature spécialisée, il sera question de faire un retour sur les différentes composantes du projet comme cas d'étude.

CRITÈRES DE PLANIFICATION

L'établissement de critères de planification est primordial pour bien définir les objectifs du projet, en prenant en compte les conditions cadres. Dans la logique de réinterprétation du processus de projet, comme un retour en arrière dans le temps à partir d'un projet déjà bien avancé (la passerelle est en phase de planification d'exécution en 2014), il faut donc revoir les critères de base. Dans cette partie, il sera question de cinq critères : les coûts, la qualité, les délais, les impacts environnementaux et les risques. Le but est de faire ressortir les points les plus déterminants pour le projet qui seront ensuite intégrés à la conception BIM.

COÛTS

L'estimation des coûts par rapport à la réalité est un point majeur dans beaucoup de projets de construction pour les clients et les architectes. Et ce n'est pas le moindre car le client doit investir une somme considérable dans la construction d'un bâtiment, ce qui implique la plus part du temps de trouver des sources de financement. L'estimation des coûts est donc une étape cruciale pour obtenir des financements et permettre au projet de se réaliser, même dans des projets à financement public cela reste un point très important car les budgets sont soumis à votation. Dans cette optique, il est important pour le client que les entrepreneurs respectent les budgets et qu'il n'y ait pas de dépassements après coup. Car même une hausse des prix relativement minime pendant la phase de construction peut, entraîner des difficultés financières pour le projet et avoir des conséquences préjudiciables à long terme.

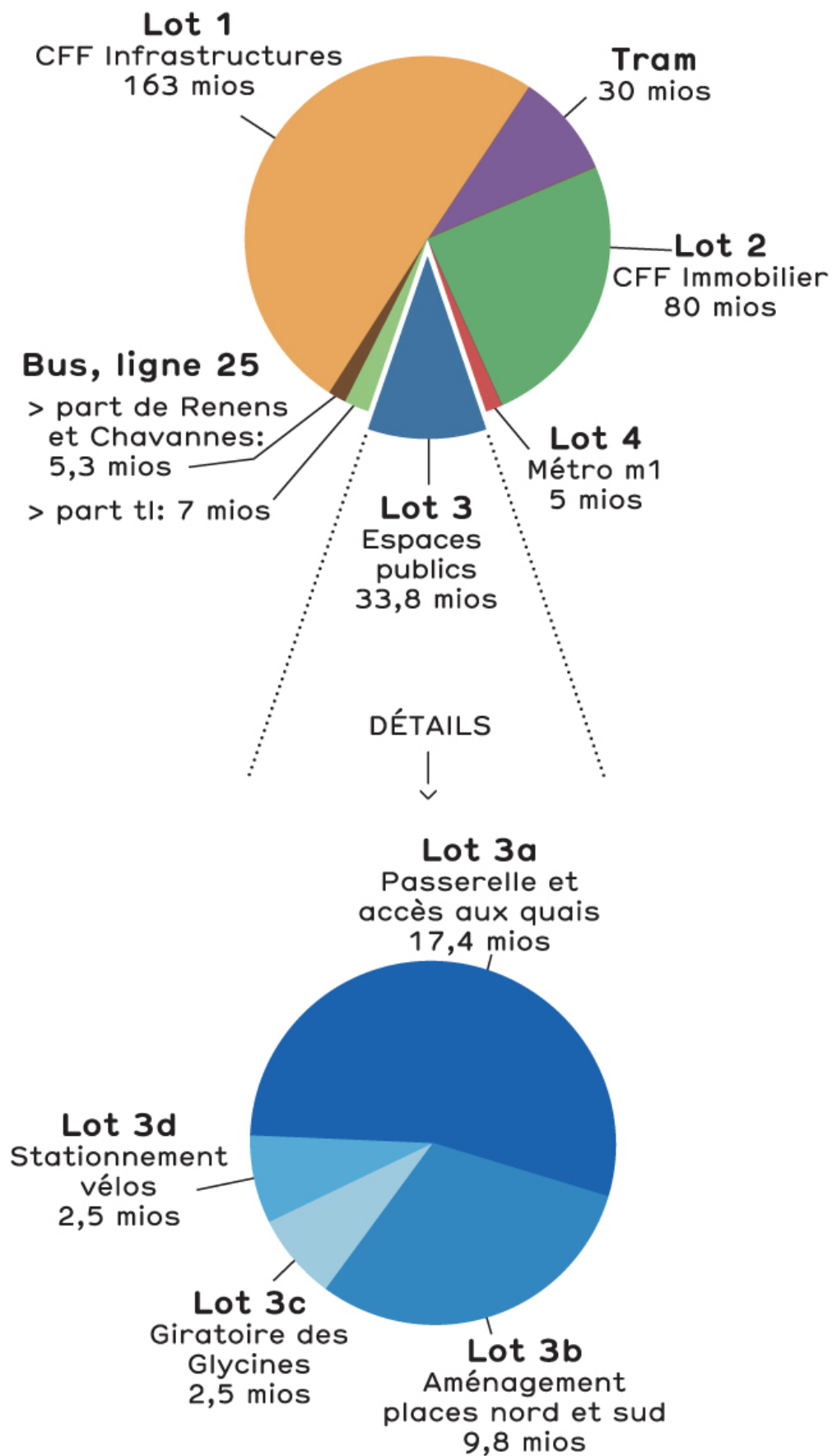
Pour bien comprendre les principes et les enjeux de l'établissement d'un budget, il faut savoir que la prévision budgétaire est un terme générique pour toutes les activités effectuées pendant la planification et la construction. Cela inclut la liste des coûts, le contrôle et la validation des budgets pour chaque phase, et aussi la mise à jour des changements de prix. L'établissement du budget fait partie des premières tâches de planification car c'est un critère déterminant pour la viabilité globale du projet.

Coûts de construction

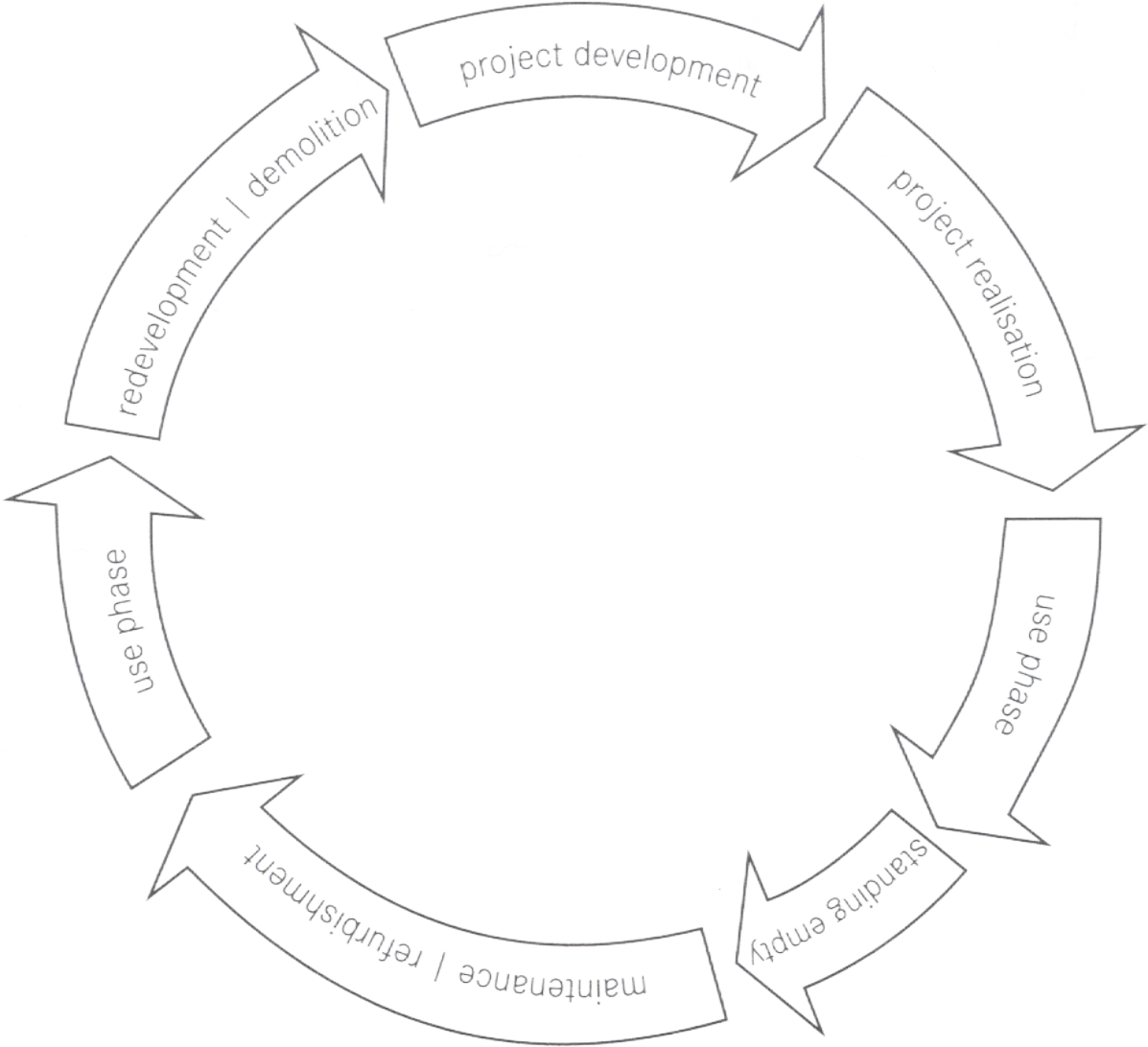
L'établissement des coûts de construction peut se faire sous forme de classification des composants du projet : on divise toutes les parties du projet en composants, généralement sur la base du Code des Frais de Construction CFC Suisse. Les composants du projet sont regroupés par catégorie, ce qui facilite l'évaluation des devis des entreprises par la suite, on retrouve par exemple sous le code 2 - Bâtiment : 20 - Excavation, 21 - Gros œuvre, 23 - Installations électriques, etc. Il est aussi possible de baser le budget sur les appels d'offre des entreprises pour avoir des prix plus proches de la réalité du marché de la construction. Dans ce cas, les offres sont plutôt structurées en fonction des différents corps de métier : couvreurs, peintres, électriciens, etc. Enfin il y a la méthode de calcul basée sur le volume bâti ou la surface de plancher, qui sont des paramètres facilement calculables à partir des plans, qui est plutôt utilisée pour des estimations d'avant-projet assez grossières.

D'une manière générale le budget peut être influencé par plusieurs facteurs :

- Les coûts d'acheminement des matériaux et matériels
- Les coûts énergétiques du chantier



Budget estimatif, estimation des coûts de l'ouvrage (TVA et honoraires), 2013.



Cycle de vie des coûts

- Les coûts d'infrastructure du chantier (grues, installations, protections, machines...).
- Les aléas sur le terrain (conditions climatiques, accidents...).
- L'augmentation des prix des matériaux et des coûts de la construction.
- Les coûts d'arrêt et de reprise du travail sur le chantier.

Cette dernière catégorie est généralement prise en compte par une formule de révision des coûts introduite dès les appels d'offres en raison de la durée globale du chantier.

En ce qui concerne les coûts prévisionnels pour le projet de la passerelle, lors de l'avant-projet, une première estimation des coûts avait évalué les études et la construction de la passerelle à 12'560'000.- [CHF] TTC. Cette évaluation réalisée par le groupement Rayon Vert prenait en compte les difficultés dues aux types de travaux et à la configuration du site (travail de nuit, par étapes, mesures de sécurité accrues, etc.), ce qui a entraîné un surcoût par rapport à des travaux plus classiques. Il est également pris en compte une marge d'approximation de +/- 15% pour les parties architecturales et de +/- 20% pour le génie civil, conformément aux règlements SIA 102 et 103. Toutefois le montant des aléas paraît un peu faible vu le niveau de complexité de la mise en œuvre et les risques importants de dépassements de budget dues aux contraintes du site et aux connaissances du projet, on verra par la suite dans la partie risques ce qu'il en est vraiment.

L'évaluation des coûts a quand même été revue à la hausse par la suite (voir schéma du budget estimatif de 2013 ci-contre) avec la définition plus précise du projet, les coûts de construction de la passerelle s'élèvent ensuite à 17'400'000.- [CHF] TTC. Il faut d'ailleurs préciser que les chantiers en ville peuvent s'accompagner de surcoût dû au manque de place pour les zones extérieures du chantier (stockage, déchargement, baraquements), comme par exemple la location de terrain supplémentaire ou la fermeture d'une route.

Cycle de vie budgétaire

Les fluctuations budgétaires au cours de la construction peuvent paraître considérables, mais rapportées à l'échelle du cycle de vie du bâtiment, il s'agit en fait d'une période plutôt courte, même si le coût de construction reste généralement le poste le plus élevé dans le budget à long terme du bâtiment. Par cycle de vie on entend : coût de développement, de réalisation, d'exploitation, de rénovation, et de déconstruction. Certaines décisions techniques, comme par exemple le choix du type de construction ou du type de lot secondaire, peuvent avoir des conséquences sur l'utilisation et d'une manière plus générale sur tout le cycle de vie du bâtiment, avec un impact particulier sur les coûts de fonctionnement.

Parfois les budgets d'exploitation (chauffage, eau, électricité, entretien, etc.) sont tels que sur toute la durée de vie du bâtiment, ils peuvent dépasser le coût de construction initial. Pour réaliser des économies sur ses postes, il est intéressant de se tourner vers des équipements techniques plus performants, de changer certains choix constructifs ou même de modifier le programme du projet. Il s'agit d'un processus itératif et requiert une vision globale du projet, ce qui est facilité par l'utilisation de la maquette numérique comme on le verra dans la dernière partie de l'énoncé.

En ce qui concerne le cas d'étude de la passerelle un point important à prendre en compte dans le cycle de vie budgétaire est le coût d'entretien et de rénovation. Car la moindre intervention sur un site aussi contraignant représente un budget important, sachant qu'on ne peut pas monter un échafaudage sur les rails pour repeindre la structure ou changer une pièce. Cette contrainte supplémentaire devrait être prise en compte lors des choix constructifs et techniques pour réduire cette problématique.

QUALITÉ

Retour d'expérience

Après le concours, les architectes du bureau Farra & Fazan ont été invités à visiter le chantier de la passerelle de la Paix ; traversée de 160 mètres au dessus de l'enchevêtrement de rails dans le quartier de Sécheron à Genève (18 voies CFF). Réalisée à la suite d'un concours remporté en 2004 par l'architecte Pierre-Alain Dupraz en partenariat avec l'ingénieur Laurent Chablais, elle a été inaugurée en 2014. Dans cet exemple, il s'agit avant tout de relier deux quartiers coupés par les voies ferrées et non pas de permettre l'accès à des quais, cette passerelle étant située à l'extérieur de la gare, les trains ne font que passer dessous. Même si cette passerelle est plus envisagée comme un pont, avec un seul appui central au milieu des voies, alors que dans notre cas d'étude c'est un élément connectant, elle illustre parfaitement les contraintes constructives dues au franchissement des voies CFF. En effet, il est impossible de construire un échafaudage par dessus le passage d'un train, il a alors fallu trouver une solution pour construire la passerelle en tronçons suffisamment légers pour être déposés par une grue sur des piles provisoires construites préalablement au milieu des rails. Pour ce faire les ingénieurs en charge du projet ont dû faire venir la plus puissante grue d'Europe, dont le bras fait 70 m et d'une capacité de 6'500 tonnes mètre.

D'après l'entreprise de béton Holcim (Suisse) SA, le principal défi à relever fut la réalisation de l'appui central à cause du manque de place et de l'exposition du site. En effet le passage ininterrompu des trains a obligé les constructeurs en accord avec les CFF à trouver des solutions astucieuses pour sécuriser le site malgré le manque de place entre les rails.

Par exemple le coffrage de la pile a été surdimensionné pour servir de paroi de protection pour les travaux et permettre ainsi de couler du béton à quelques mètres d'un train en marche rempli de voyageurs.

Le bétonnage de la pile ne pouvait pas se faire à l'aide de la grue alors il a fallu utiliser du béton pompé, acheminé par une conduite posée à travers les voies, d'une manière générale tout les matériaux ont été acheminés entre deux passages de train. Cette contrainte implique une coordination du planning des livraisons avec les CFF et donc tout retard est exclu.

La passerelle est composée de cinq travées, la structure métallique est ensuite re-divisée en une quarantaine de tronçons directement acheminés sur le site et soudés entre eux dans les zones d'assemblages du chantier.

Forme et fonction

La fonction de la passerelle est complètement liée à son rôle urbain, au delà du simple transit des voyageurs, il faut que la passerelle soit accueillante et représentative du centre de Renens au même titre que les places Nord et Sud. La forme elle suit la fonction et répond de manière concrète à des contraintes d'accessibilité, de visibilité, d'accueil du public, de praticité pour les voyageurs. Le projet de passerelle devra donc répondre à des exigences de qualité élevées car c'est un élément architectural très visible dans le paysage urbain et également un lieu de passage très fréquenté. Cette volonté de qualité élevée se retrouve dès la phase de concours dans les modalités :

« Il a donc été demandé de considérer : La qualité des liaisons piétonnes [...], la qualité des zones d'attente, l'ambiance et le sentiment de sécurité [...] » (WIDMER Ariane, 2007. Secteur gare Renens,



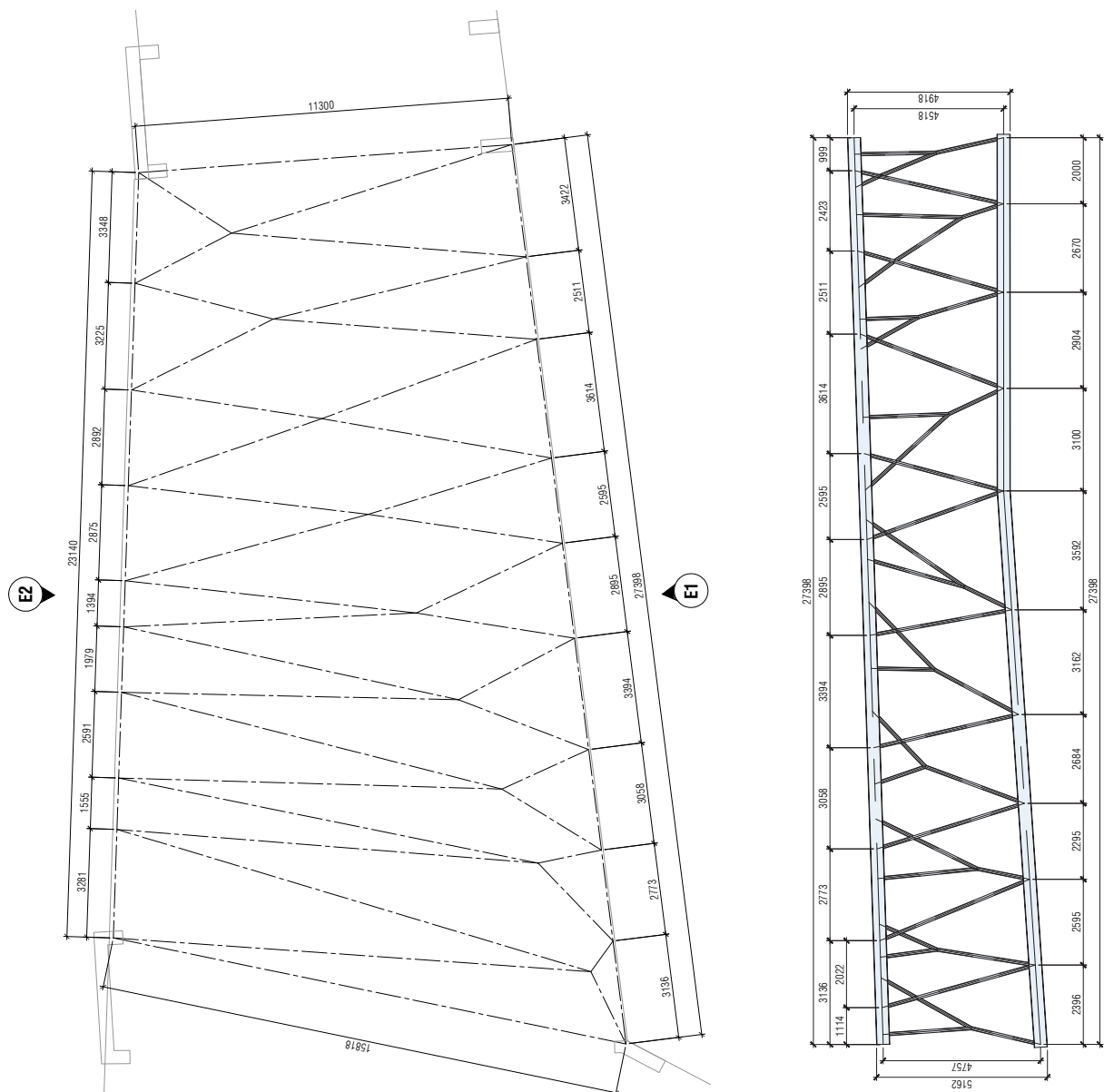
Coup d'œil sur le quai, sur lequel se dresse l'appui central de la passerelle, comportant deux piles: l'une verticale et l'autre inclinée



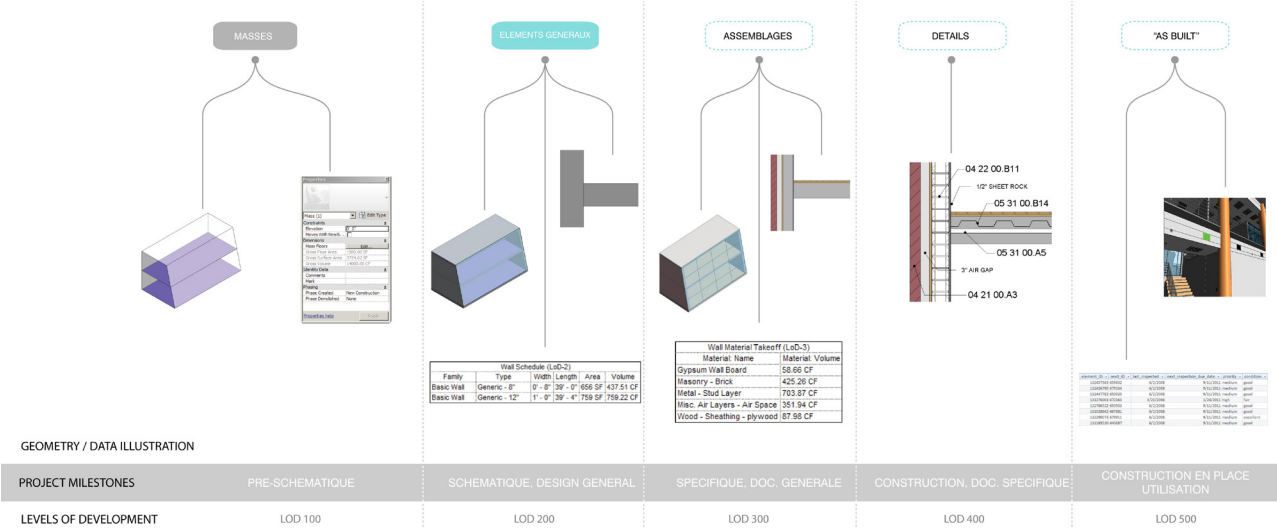
© Marti Construction SA

Le coffrage, rigidifié au moyen de profilés métalliques, se prolonge par dessus le gabarit de la voie CFF contiguë

Photos de la passerelle de la Paix, Genève, 2013 - 2014.



Plan de la structure de la toiture, phase d'avant-projet



Organigramme des niveaux de développement suivant les phases BIM

Ouest lausannois : interface des transports publics : rapport du jury du concours : Chavannes-près-renens, Crissier, Ecublens, Renens, Etat de Vaud, CFF, TL. Renens : Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois, extrait p. 15).

Comme dans de nombreux projets publics, le bâtiment a une double fonction utilitaire et esthétique, ce n'est pas une infrastructure ferroviaire classique. La phase de réalisation doit être particulièrement maîtrisée pour atteindre un niveau de qualité suffisant et répondre à cette exigence, ce qui est compliqué vu le type de site. De plus la forme qui s'adapte aux flux des voyageurs n'est pas régulière et a amené les architectes à proposer avec les ingénieurs Guscetti et Tournier, une structure plutôt complexe et évocatrice de végétation.

La structure reprend le thème initial du concours qu'était l'apport de «vert» dans un paysage urbain, avec une esthétique qui demande une réalisation d'une grande qualité. Les profilés métalliques sont pré-assemblés avec des tirants pour former des parois, qui sont ensuite assemblés sur le site du chantier en tronçons puis assemblés entre eux sur place à l'aide de la grue. Toute ces étapes depuis la fabrication jusqu'à la mise en œuvre donne lieu à de multiples possibilités d'erreur et de variation qu'il va falloir contrôler et corriger.

La forme particulière des encrages aux places Nord et Sud est donnée à la fois par la fonction de la passerelle qui est de connecter les deux places de manière fluide et par le programme qui inclut des commerces, des locaux techniques, des ascenseurs, des espaces pour les vélos, etc. La passerelle doit également traiter le front urbain au nord suite à la destruction des immeubles actuels pour la création du quai et d'une voie RER supplémentaire.

DÉLAIS

Conduire un projet jusqu'à sa réception par le maître d'ouvrage est un processus long qui implique de nombreux acteurs et nécessite une coordination étroite de toutes ces contributions. Les architectes et les planificateurs de projet représentent le client pour toutes les questions techniques, ils sont donc responsables du bon déroulement du processus et sont les seuls à avoir une vraie vue d'ensemble sur le projet. Dans ce chapitre on traitera de la question des délais dans un projet en abordant la planification, au sens de l'enchaînement de tâches élémentaires clairement définies, liées entre elles par des fonctions logiques. L'attention portera sur la notion de chemin critique, primordial dans un projet.

Planning de documentation

La mise en place d'un planning de documentation est essentielle pour assurer le bon déroulement du projet de la planification à l'exécution. Pour respecter les délais administratifs et les cycles de validation des différents experts, il faut que la production de plans et de documents suive, et respecte le niveau de détails requis pour chaque phase. Le planning intègre également les livraisons des plans des différents spécialistes, qui si elles ne sont pas respectées peuvent considérablement retarder le projet. L'utilisation du BIM permet de mieux gérer cette transmission d'informations entre les différentes équipes, avec des cycles de validation et un découpage du projet en phases clairement identifiables (voir l'organigramme ci-contre).

Planning général

Un planning de projet pour être efficace se base sur l'identification et l'analyse détaillée des tâches de travail, qui vont ensuite être combinées en fonction de leur durée et des séquences possibles. L'analyse des tâches permet de déterminer plus efficacement les séquences d'enchaînement des tâches et d'éviter les retards dus à une mauvaise coordination du travail des différentes équipes sur le chantier. Enfin le planning va inclure les délais, les points clés et les échéances (Milestone), pour anticiper les conséquences de retards sur l'ensemble du planning.

Dans le cas de l'étude qui nous intéresse, la contrainte porte sur une planification fine et maîtrisée des tâches en raison d'une coactivité avec d'autres chantiers (voir le détail dans le calendrier prévisionnel des travaux ci-contre). La construction de la passerelle est découpée en six étapes qui s'imbriquent dans les phases de travaux de l'ensemble du projet de réaménagement de la gare, entrecoupée d'arrêts, allant de plusieurs mois à plusieurs années. La temporalité de l'exécution est un aspect significatif du projet, car peu commun et nécessitant une bonne préparation de chaque phases, appelées «stop and go» ce qui signifie que le planning doit être parfaitement géré pour réussir à construire la passerelle dans les périodes de construction imposées. L'étalement de la durée des travaux augmente les incertitudes dans le planning et rend difficile la cohérence à long terme de la gestion des délais.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Cette partie se base sur la Recommandation SIA 112/1 « Construction durable - Bâtiment » qui ne constitue pas une obligation juridique, car c'est une norme privée d'associations professionnelles. Mais cela reste une référence car la loi ne donne que des valeurs limites de pollution et des ordonnances, notamment l'ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement pour les installations qui peuvent « affecter sensiblement l'environnement » (ZUFFEREY J.B., 2010. *La construction et son environnement en droit public*, p. 180).

Les recommandations de la SIA sont elles plus contraignantes et plus détaillées.

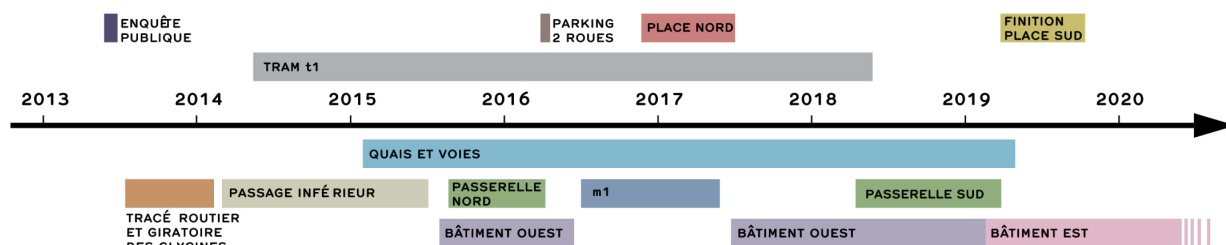
Matériaux de construction

Une gestion durable des matériaux de construction passe par :

- La disponibilité des matières premières : matières premières renouvelable, recyclées ou largement disponibles.
- Les impacts environnementaux : réduire les impacts environnementaux lors de la fabrication.
- Les polluants : réduire les polluants dans les éléments de construction.
- La déconstruction : utiliser des matériaux facilement séparables et planifier la construction en vue d'une réutilisation / récupération.

Actuellement en Suisse la meilleure source d'information concernant l'impact environnemental des matériaux de construction, est l'Association des maîtres de l'ouvrage publics Suisse Eco-Bau, qui est une plate-forme des offices et des services de construction durable des pouvoirs publics.

Cette association travaille en collaboration avec le Centre d'études pour la Rationalisation de la



Calendrier prévisionnel des travaux, 2013

Planification Stratégique	Etude préliminaire	Project	Appel d'offres	Réalisation	Exploitation
Recommandation SIA 112/1 Construction durable – bâtiment					
SMEO – Fil rouge pour une construction durable					
Standard pour construction saine et écologique MINERGIE-P/A-ECO®					
Catalogue des éléments de construction					
		Fiches ECO-CFC			
		eco-devis			
		ECO-Produits			
		Climat intérieur			
Recommandation KBOB/eco-bau/IPB-Empfehlungen					

Tableau Instruments de Planification, Eco-Bau

Construction CRB, en se basant sur le Catalogue des articles normalisés CAN, du CRB qui décrit les matériaux et les systèmes utilisés dans la construction. L'association Eco-Bau produit des recommandations et des outils comme les fiches de construction écologique ECO-CFC qui mettent en évidence les qualités écologiques des matériaux.

Ces fiches technique permettent aux professionnels de privilégier des matériaux sans danger pour l'environnement et la santé ceci dès la planification et les appels d'offres, ce qui permet de ne pas entraîner de surcoûts par la suite. Suivant les besoins spécifiques du projet, on peut ainsi savoir quels sont les matériaux ayant nécessités peu d'énergie grise dans le cycle de fabrication, n'émettant peu ou pas de polluants et dont l'élimination est facile. Cela qui permet déjà d'avoir une bonne partie des critères de durabilité recommandées par la SIA 112/1. L'évaluation des matériaux se fait selon une classification : 1er priorité, 2ème priorité et non recommandé; en tenant compte de l'impact environnemental pendant toute la durée de vie du matériau.

Eco-Bau fournit également un catalogue des éléments de construction qui permet de rapidement calculer la valeur U et de trouver les caractéristiques écologiques d'éléments de construction.

Le calcul du bilan d'énergie grise du bâtiment, qui correspond à la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie du bâtiment. En ce qui concerne le calcul de l'écobilan, le catalogue se base sur les « données des écobilans pour la construction » selon la Recommandation KBOB / eco-bau 2009 / 1 (Coordination des services fédéraux de la construction et de l'immobilier).

Ces outils de planification seront très utiles et intéressants à intégrer dans la démarche du BIM car ils regroupent les principaux critères de planification pour un projet durable, même si on va le voir par la suite, les critères de consommation énergétique d'exploitation ne sont pas les plus déterminants dans le projet de la passerelle.

Énergie de réalisation et d'exploitation

La réalisation et l'exploitation d'un bâtiment peut être une source de gaspillage énergétique importante, c'est pourquoi il existe une réglementation dans le domaine. Pour rester dans le cadre de l'étude de cas dans le Canton de Vaud, la référence principale est l'article 97 de la LATC - VD (loi sur l'aménagement du territoire et les constructions, Canton de Vaud) concerne : l'« utilisation rationnelle et [les] économies d'énergie dans les constructions ». La Recommandation SIA 112/1 « Construction durable - Bâtiment » propose une classification des domaines d'interventions plus précise :

- Besoin de chaleur ou de froid : réduire la consommation d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement par des mesures constructives et techniques.
- Eau et électricité : réduire les consommations.
- Couverture des besoins en énergie d'exploitation : utiliser au maximum les énergies renouvelables.

En ce qui concerne le cas d'étude, comme ce n'est pas un bâtiment chauffé et qu'il n'y a pas de sanitaires, exception faite du local commercial au sud, les consommations d'exploitation sont assez limitées : l'électricité pour l'éclairage, les ascenseurs et les escalators; le chauffage des locaux commerciaux et l'eau d'arrosage des plantes.

La consommation la plus significative est l'électricité dont le coût est connu. Le chauffage des locaux commerciaux pourrait bénéficier d'une installation plus économique en utilisant des matières premières renouvelables, et la consommation d'eau pourrait par exemple être améliorée par une récupération de l'eau de pluie en toiture pour l'arrosage. Pour ce qui est des énergies de réalisation, l'élément significatif est l'énergie grise due aux transports des matériaux. Le coût énergétique et l'impact environnemental augmentent en raison du lieu de provenance des matériaux, et particulièrement dans le cas de productions fabriquées en usine. Il faut privilégier des matériaux de construction produit localement.

Cycle de vie

L'intégration des principes de développement durable se fait sur l'ensemble du processus de construction car c'est une phase que l'on a vu pourrait être améliorée d'un point de vu de l'impact environnemental. Mais la démarche initiée notamment par les pouvoirs publics en la matière ne s'arrête pas là, en effet le but est d'appliquer ces principes à l'ensemble du cycle du vie du bâtiment : études, réalisation, exploitation, restructuration ou rénovation, déconstruction et recyclage. L'État de Vaud a par exemple mis en place des outils d'évaluation de durabilité pour les phases de définition des objectifs, les concours publics, les études et les appels d'offres. Ce programme de valorisation du développement durable dans le domaine de la construction a été mis en place en 1999, et vise à évaluer les projets et stimuler les acteurs de la construction à réfléchir à cette problématique. Dans cette optique l'État de Vaud a dû développer en collaboration avec d'autres organismes des outils d'évaluation spécifiques lorsqu'ils n'existaient pas. Par exemple pour la définition des besoins et la planification l'outil ALBATROS, développer avec le SIPAL Service Immeubles, Patrimoine et Logistique; permet de prendre en compte les critères de développement durable et d'analyser les différents scénarios possibles. Pour l'évaluation des projets lors des concours publics c'est l'outil SMEO -Fil rouge pour une construction durable qui a été développé avec l'association Eco-Bau; il tient compte de sept critères sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment proposé. C'est deux outils sont compatibles et sont basés sur la Recommandation SIA 112 / 1.

Enfin pour ce qui est des études, les résultats des outils mis en place ne sont pas probants. Pour les appels d'offres, l'évaluation écologique des produits lors du choix des matériaux ce fait avec les fiches ECO-CFC, comme on l'a vu précédemment. Le fait que la mise en place de ce programme de développement durable passe par une vision du projet très large dans son cycle de vie facilite son intégration dans le processus de BIM qui fonctionne suivant la même logique (voir schéma p. 9), ces critères de développement durable seront importants par la suite dans le projet.

Dans cette démarche on pourra par exemple agir sur le choix du système constructif ce qui aura une influence sur les impacts environnementaux dans le cycle de vie du bâtiment, en choisissant un système qui facilite le remplacement de ces éléments constructifs aux durées de vie différentes.

Le chantier et son environnement

Ce sujet n'est pas traité dans la Recommandation SIA 112/1 mais il est important de l'aborder dans le cadre de cette énoncé car le chantier et ses impacts sont des critères importants à intégrer au BIM pour la suite dans le projet.

Les travaux de construction peuvent également porter atteinte aux sols et contaminer les sites, qu'elles sont alors les protections prévues par loi?

La loi prévoit une ordonnance sur les atteintes portées aux sols (art. 33 à 35 LPE) dont le but général est de préserver la fertilité du sol contre les atteintes chimiques, biologiques ou physiques.

Il y a également l'article 91 de la LATC - VD qui concerne l'assainissement et la protection du sol, les directives techniques de l'office fédéral de l'environnement qui s'occupe du bruit des chantiers, la valorisation des déchets de chantier et les méthodes d'analyses des sites pollués et des matériaux d'excavation. (ZUFFEREY J.B., 2010. *La construction et son environnement en droit public*, p. 186).

Dans le cas d'étude de la passerelle ce n'est pas vraiment une contrainte majeure, par rapport à un projet en milieu plus rural où la préservation de la fertilité du sol est importante, ici on s'en tiendra aux prescriptions légales pour éviter toute pollution du sol. Par contre le contexte urbain du chantier pose le problème de la gestion des déchets de chantier.

Cette question a longtemps été traitée de manière secondaire, le but étant d'éviter l'encombrement

Niveau de Gravité (IxP)		Probabilité (P)				
		Très faible $P \leq P1$	Faible $P1 < P < P2$	Moyen $P2 < P < P3$	Elevé $P3 < P < P4$	Très probable $P \geq P4$
Impact (I)	Très Fort $I \geq I4$	H2 Significatif	H2 Significatif	H1 Critique	H1 Critique	H1 Critique
	Fort $I3 < I < I4$	H2 Significatif	H2 Significatif	H2 Significatif	H1 Critique	H1 Critique
	Moyen $I2 < I < I3$	H3 Mineur	H2 Significatif	H2 Significatif	H2 Significatif	H1 Critique
	Faible $I1 < I < I2$	H3 Mineur	H3 Mineur	H2 Significatif	H2 Significatif	H2 Significatif
	Très Faible $I \leq I1$	H3 Mineur	H3 Mineur	H3 Mineur	H2 Significatif	H2 Significatif

Matrice de risques basé sur la méthode ALARP

du chantier par une évacuation régulière vers une décharge, ce qui peut devenir un vrai problème pour les chantiers urbains qui ont une zone de chantier très limitée. La situation a bien évolué ces quinze dernières années sur le plan écologique et économique. Ces déchets représentent quand même un tonnage annuel deux fois et demie supérieur aux ordures ménagères.

Les principales actions juridiques dans ce domaine sont : l'Ordonnance fédérale sur le traitement des déchets (OTD), la directive cantonale sur la gestion des déchets de chantier (DCPE 872) et de manière plus indicative la Recommandation pour la gestion des déchets de chantier (SIA 430). Le but principal de toutes ces mesures est d'encourager le tri des déchets sur le site du chantier pour éviter que tout arrive mélangé à la décharge, ce qui les rend inaptés au recyclage et non combustibles du fait de leur forte teneur en matière minérale.

RISQUES

Le principe de la gestion des risques est d'identifier les risques dans différents aspects du projet, de les classer par ordre de gravité et de proposer un plan de gestion des risques. Pour identifier les risques liés à la conception technique on peut faire une analyse descendante en partant du général et en détaillant progressivement les différentes parties du projet. On peut également faire une analyse montante où l'on part du détail pour arriver au général, dans tous les cas le but est de faire la liste de tout ce qui pourrait arriver lors des différentes étapes de construction. Ces méthodes d'analyse sont largement inspirées de la pratique industrielle où la gestion des risques est bien plus développée que dans le domaine du bâtiment. Pour qu'elle soit efficace l'analyse de risque doit contenir la somme des expériences de tous les acteurs en jeu dans le projet. La gestion des risques se fait également au niveau des coûts, du planning des tâches, du contrôle de la qualité, des périodes de construction ou bien des coûts des matériaux.

Par exemple dans notre cas d'étude du projet de la passerelle à Renens, les périodes de constructions sont des facteurs de risques importants car la mise en œuvre va durer longtemps et subir de nombreuses interruptions, dues à la coordination du chantier avec les autres lots du projet. Les coûts d'interruption du travail sur le chantier et les risques de retards que cela implique ne sont pas négligeables, ce risque si il n'est pas pris en compte peut à terme mettre en danger le projet. Le plan de gestion des risques permet de prévoir des actions pour limiter les risques les plus dangereux et les plus probables parmi tous ceux mis en évidence par l'analyse.

Le concept de « risque » ne doit pas être pris au sens négatif comme le serait un problème de sécurité, il s'agit d'abord d'un manque de connaissances sur l'état des choses ou la probabilité d'être exposé à un problème donné. Dans le cas du risque de dépassement des coûts de construction, il ne s'agit pas de quelque chose de vraiment dangereux si l'analyse le prévoit, ce qui peut être dangereux c'est de ne pas prévoir un budget suffisant pour les dépassements dès le début du processus. Les risques sur les coûts peuvent provenir de domaines divers, comme par exemple les risques liés aux fluctuations des prix du marché de la construction peuvent entraîner des changements dans le budget au cours de la construction. Ce risque est d'autant plus important si la mise en œuvre s'étale sur plusieurs années, dans notre cas d'étude les phases de chantier sont planifiées sur quatre ans. Enfin une source de risque potentielle est l'évolution du besoin du client en cours de projet, dans notre cas il s'agit des communes, de l'État de Vaud et des entreprises de transport. La prise en compte de l'évolution des besoins et du programme est un élément que le BIM peut prendre en compte de manière tout à fait intégrée. C'est pourquoi cet élément sera plutôt pris comme une opportunité dans le futur projet plutôt que comme un risque.

CHANTIER

Cette partie de l'analyse se base sur la juridiction Suisse en matière de construction, les règles établies par les associations professionnelles concernées et les normes Européennes.

Le chantier est une phase importante du projet vu dans sa globalité, c'est là que se concrétise la vision de l'architecte est que la temporalité du projet prend toute son importance.

Le choix du cas d'étude d'un projet en milieu urbain, implique des questions de site exigu et un tas de contraintes liées au chantier qui auront une incidence sur le projet. Mais qu'elles sont véritablement les spécificités d'un chantier sur un site exposé et exigu comme celui de la gare ? C'est à cette question que nous allons tenter de répondre dans ce chapitre.

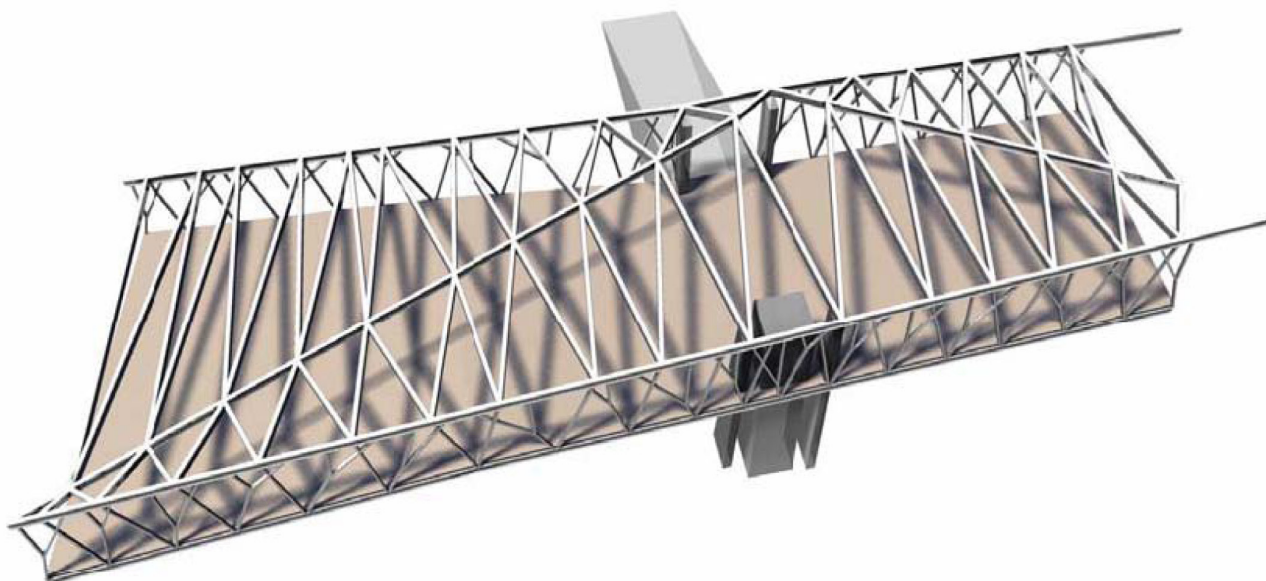
PLANIFICATION

Une planification de chantier est bien menée si elle réussit à atteindre les objectifs de coûts, de délais et de qualités généralement fixés avec le client, parfois on l'a vu il peut y avoir des objectifs supplémentaires contraignants pour le projet. Une fois terminée la conception, le planning des soumissions et les plans d'exécution complets, on revient sur les appels d'offres pour choisir les entreprises et pouvoir ainsi commencer la mise en œuvre. A partir de là le travail du gestionnaire de chantier, en plus du rôle de coordinateur pour les entreprises, va être aussi de contrôler et évaluer les objectifs du projet en terme de coûts, de délais et de qualité. Ce contrôle va permettre de se rendre compte des divergences par rapport à la planification avant la fin des travaux et pouvoir les corriger. On peut alors comprendre que plus la planification est précise et plus il sera facile de déceler et d'anticiper les problèmes. Dans le cas de l'étude qui nous intéresse, on a vu que la planification de la mise en œuvre est une phase très importante du fait des contraintes du site.

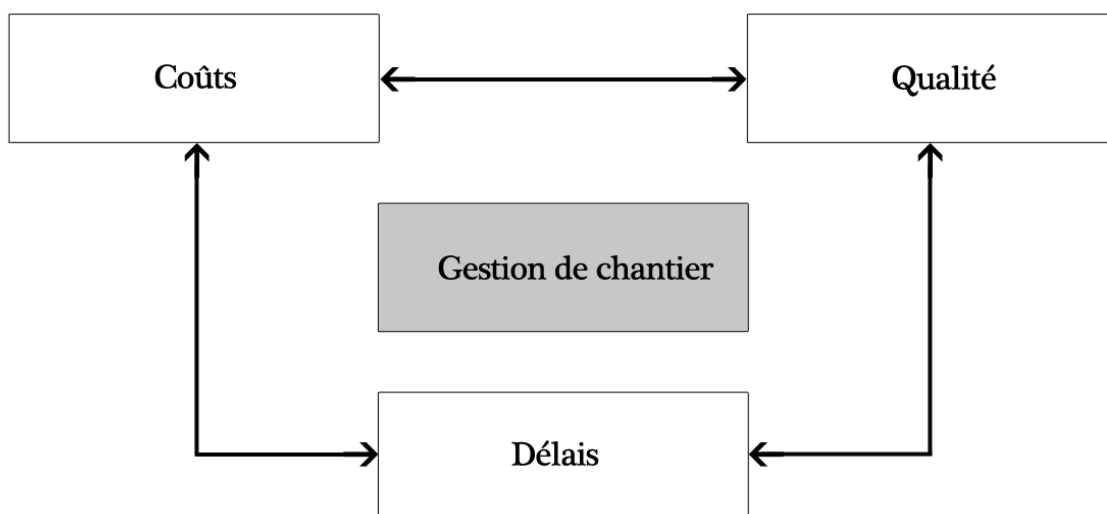
La coordination avec d'autres projets oblige à avoir des phases de chantier ce qui complique la planification, en plus du manque de place et du maintien de l'activité de la gare. Le gestionnaire de chantier a aussi pour rôle de vérifier que l'organisation du chantier et les approvisionnements en matériaux suivent le plan mis en place avec les autorités. L'approvisionnement en matières premières du chantier doit être assuré même si, dans le cas d'un chantier urbain, il est limité par la place disponible pour le stockage. Il est également responsable de la conformité de la réalisation avec les plans du permis de construire, ce qui est aussi une obligation légale, ainsi que le respect des normes de sécurité tout au long du chantier pour éviter toute menace envers les travailleurs ou toutes autres personnes.

Les choix constructifs

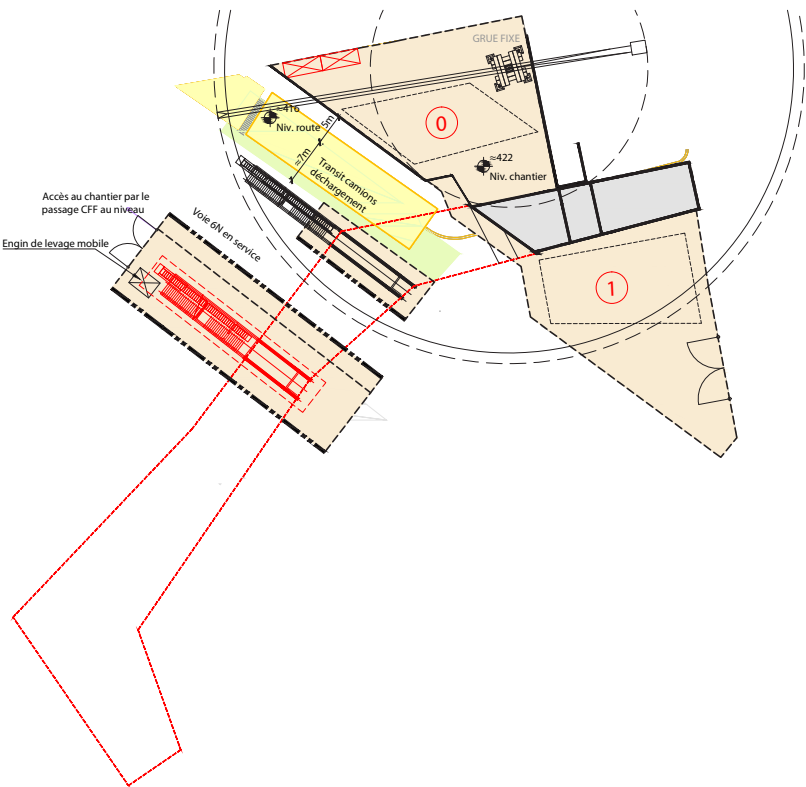
La thématique de la sécurité de chantier sera développée plus loin dans le chapitre sachant que c'est une contrainte importante du site qui nous intéresse pour le cas d'étude. Le choix de la méthodologie constructive est aussi importante par rapport à la planification de chantier, certaines solutions permet de considérablement simplifier les étapes. Par exemple la préfabrication de plus d'éléments peut être avantageuse ou bien le pré-assemblage de plus grands tronçons de la passerelle directement livrés par trains pourrait éviter l'utilisation de plusieurs grues. On pourrait aussi imaginer un autre type de structure où les tronçons sont poussés sur leurs appuis définitifs ce qui permet aussi d'éviter l'utilisation coûteuse des grues.



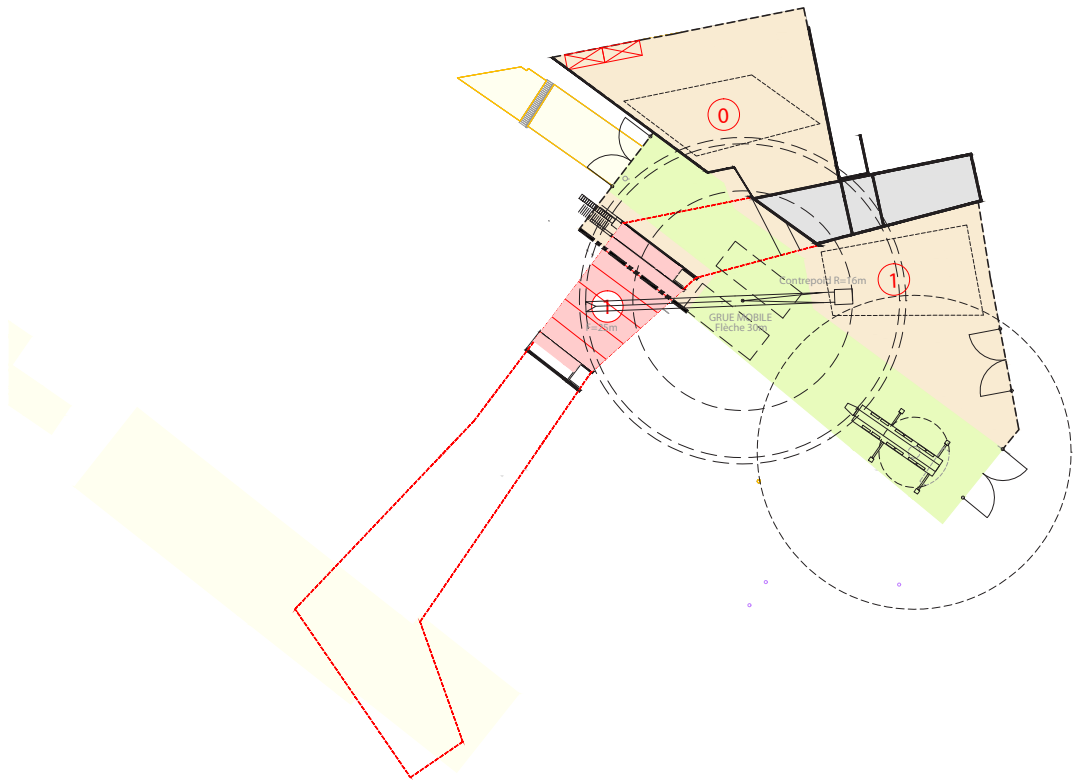
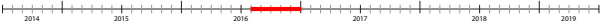
Vue de la structure de passerelle, phase d'avant-projet



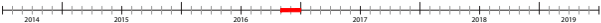
Taches principale de la gestion de chantier

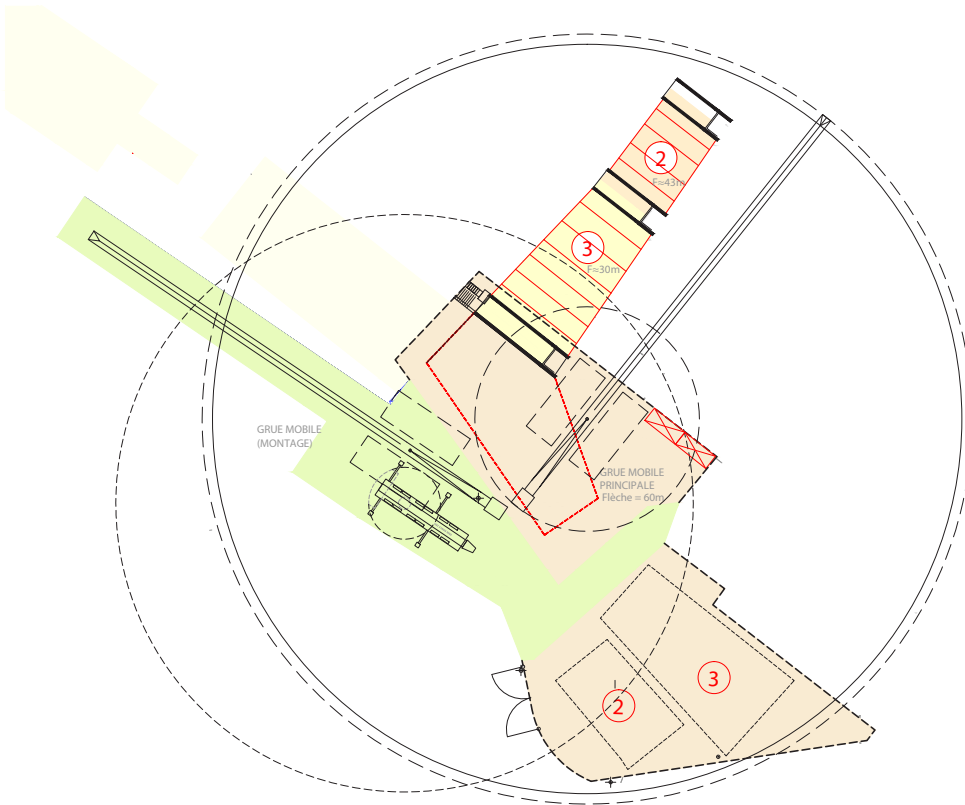


ETAPE 2 (PHASE 8 : 08.2016 - 12.2016)

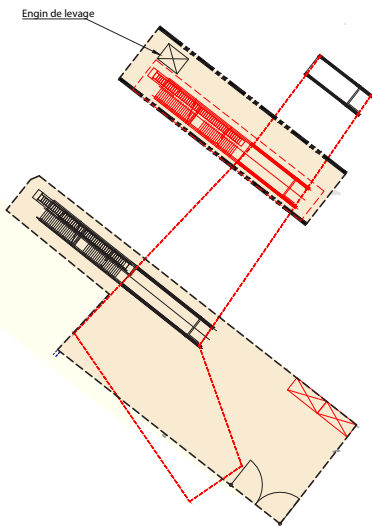


ETAPE 2.3 (pose tronçon sur voies 1 nuit)





ETAPE 5.2 (PHASES 14 - montage grue 1 semaine, pose des tronçons 2 nuits et 4 jours démontage)



ETAPE 4 (PHASE 13 : 06 - 08.2018)



Schémas phases du chantier

Le choix du béton coulé sur place pour les piles peut aussi être discuté car il impose une coordination contraignante du chantier avec celui des CFF (voir détail des étapes de construction ci-après) alors que d'autres choix constructifs auraient été possibles. Tout ces choix seront plus discuté lors du projet de master avec notamment l'approche BIM, mais d'une manière générale on peut dire que l'approche de la conception est un point important à revoir.

Enfin il faudra aussi prendre en compte dans la planification les périodes de constructions qui peuvent influencer l'organisation du chantier qui peuvent être par exemple administratives, climatiques, etc.

ORGANISATION DE CHANTIER

Il s'agit de traiter avec des personnes aux intérêts différents, et malgré tout d'assurer la coopération des équipes sur le chantier. Cette coordination passe par l'arbitrage de ses intérêts avec ceux du client et la prise de décisions claires aux bons moments. Le gestionnaire de chantier a en plus de son rôle de médiateur, celui de prévoir les équipements et installations utiles.

Suivant le type de bâtiment et sa taille il faudra prévoir des installations de chantier en conséquence en terme de grues, d'espaces de stockage, de baraquements, de containers pour le village de chantier et d'accès pour le déchargement des matériaux et éléments préfabriqués.

C'est une longue liste sachant que l'emprise du chantier possible dans notre cas d'étude est très limitée comme on l'a vu précédemment, ce qui complique l'organisation du chantier par rapport à une situation plus classique. Le type d'installations et d'équipement nécessaire vas aussi dépendre de l'environnement (centre ville, zone de construction, autres chantiers à proximité, etc.), de la période de construction, de la saison et de la méthode constructive choisie.

La méthode constructive choisie pour la passerelle nécessite une zone de pré-assemblage qui dans ce cas est une limite pour la taille des éléments préfabriqués. On a aussi vu que la place sur la zone d'assemblage est très limitée pour la construction des piles, à cause du passage pour les voyageurs. D'une manière générale les différentes zones du chantier doivent être contenues dans le rayon accessible de la ou les grues, pour pouvoir utiliser les installations de chantier d'une manière optimale. Cette organisation peut être revue au cours du chantier surtout s'il y a plusieurs étapes discontinues. Pour le développement de cette partie, il faudra prévoir une carte des accès autour du site et vérifier s'il y a des terrains libres utilisables ou de la place pour garer les camions et les engins.

NUISANCES

La pollution sonore est un problème en ville avec la multiplication des chantiers et il est important de protéger la population qui se trouve à proximité direct de ces sources de bruit.

En matière de nuisances la base légale est fournie par la Confédération Suisse, avec la directive de l'office fédérale de l'environnement sur le bruit des chantiers de 2011, qui donne une évaluation des niveaux de bruit et un catalogue des mesures à appliquer en fonction de ces niveaux. Le principe de la protection contre le bruit tient compte notamment de la distance à la source du bruit par rapport au point d'émission et de la durée des nuisances. Les mesures qui en découle concernent les travaux de construction, les travaux de construction très bruyants et les transports de chantier. De

plus ces mesures sont renforcées pendant les périodes dites «à exigence de calme accrue» (OFEV, *Directive sur le bruit des chantiers*, 2011), par exemple entre 19 heures et 7 heures. Comme dans notre cas d'étude les travaux se font de nuit en zone urbaine dense, donc à proximité des habitations, ces mesures sont potentiellement très contraignantes pour l'organisation du chantier.

Il est également à noter que les travaux peuvent être un désagrément pour les utilisateurs de la gare et avoir un impact sur son image et son utilisation. Les dimensions sociologique, économique et culturelle sont aussi sujet aux nuisances du chantier, par exemple la fermeture ou le transfert vers d'autres locaux des commerces de la gare peut avoir de fortes répercussions économiques.

Les nuisances dues au chantier peuvent aussi être ressenties par les riverains plus éloignés de la zone de chantier que ce que prévoient les mesures de protection de la directive sur le bruit des chantiers, à cause par exemple des passages fréquents des camions ou de la fermeture de certains passages pour les besoins d'accès au chantier. Toutes ces nuisances doivent être prises en compte lors de la planification car elles sont déterminantes pour la concrétisation du projet.

SÉCURITÉ

Le gestionnaire de chantier est aussi responsable de la sécurité sur le chantier, ce qui implique un contrôle régulier des activités de tout les travailleurs pour s'assurer que toutes les mesures de sécurité sont respectées. La sécurité sur les chantiers est aussi contrôlée par un inspecteur de chantier également appelé HSE Hygiène Sécurité et Environnement, il a un rôle de manager de la sécurité selon la norme ISO 18 001 pour la sécurité en entreprises, la norme OHSAS 18 001 pour l'hygiène et la sécurité, et la norme ISO 14 001 pour le management environnemental.

Les normes ISO sont internationales, en suisse c'est l'Ordonnance du Conseil fédéral Suisse sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction OTConst qui complète les normes internationales et sert de base légale pour toutes les directives en matière de sécurité. Pour le canton de Vaud il s'agit de l'article 90 de la LATC - VD, normes de constructions : « Le règlement cantonal fixe les normes applicables [...] en vue d'assurer la stabilité, la solidité et la salubrité des constructions et de garantir la sécurité des habitants et celle des ouvriers pendant l'exécution des travaux. » (extrait de *La construction et son environnement en droit public*, ZUFFEREY J.B., 2010).

L'OTConst prévoit aussi des dispositions pour les postes de travail, les échelles, la protection contre les chutes, le milieu de travail, le transport, etc. Les contraintes de sécurité ne sont pas plus problématiques pour le chantier qui nous intéresse que les normes et règlements de sécurité que l'on vient de voir. Par contre l'application des règlements des CFF en matière de sécurité est, on va le voir bien plus contraignante.

Réglementation des CFF

Les CFF imposent des règles strictes en matière de sécurité pour les travaux réalisés aux abords des voies. Pour ne pas perturber le trafic ferroviaire et garantir la sécurité du personnel ces travaux s'effectuent de nuit et sous la surveillance de protecteurs CFF. Il s'agit de personnel mis à disposition par les CFF pour surveiller les trains et évacuer le personnel en cas de problème vers des dégagements de sécurité. Sachant que les travaux s'effectuent à proximité de train en mouvement, de



lignes à haute tension et dans le cas qui nous intéresse avec de nombreux voyageurs, la sécurité est un aspect très important du projet. Comme les travaux sont réalisés très régulièrement pendant la nuit, cela impose un équipement d'éclairage important, un bon inventaire et une organisation parfaite. Chaque erreur organisationnelle, peut impliquer une grosse perte de rendement. Pour la pose de chaque éléments grutés, le temps mis à disposition par les CFF où la ligne électrique qui alimente la gare est coupée est limité, c'est alors une course contre la montre qui commence pour les ingénieurs à l'image de la pose du deuxième tronçon de la passerelle Sécheron-Nation (voir illustration ci-dessous).

La réglementation qui fait foi dans le domaine provient de l'Union des transports publics qui édite la RTE Ouvrage de référence en matière de technique ferroviaire, ici c'est la RTE 20600 qui s'applique à « tous travaux exécutés sur ou à proximité de ces installations » (UTP, rapport du Colloque spécialisé installations électriques ferroviaires, 2012, Bern).

Cette réglementation impose également un chef de la sécurité interne à l'entreprise de construction en complément des protecteurs CFF, qui doit avoir été spécialement formé. Il faut également un code couleur pour les casques de chantier, des signaux d'alarmes spécifiques, des distances de sécurité suivant les situations, une mise à la terre systématique de toute les machines de chantier et évidemment un dispositif de protection du chantier (écrans de protection en zone dangereuse). Toutes ces contraintes au niveau du chantier font que les entreprises doivent être habilitées pour pouvoir soumissionner lors des appels d'offre ce qui limite le choix pour les maîtres d'ouvrage représentés par le SDOL.



Pose du deuxième tronçon de la passerelle Sécheron-Nation de nuit

SYNTHÈSE

LE PROJET EN SUBSTANCE

L'analyse de l'historique et de la conception de la passerelle pour la gare de Renens a permis de mettre en évidence les principales contraintes qui vont être retenues pour la suite de mon projet. Au niveau du contexte il s'agit d'un environnement urbain, du flux des passagers et de l'aménagement des infrastructures ferroviaires. Pour ce qui est des critères de planification, on retient d'abord pour ce qui concerne les coûts : la variabilité des coûts de construction, par rapport aux choix constructifs et des coûts d'entretien et de rénovation, par rapport aux contraintes du site. Pour ce qui est de la qualité les points importants sont : l'exemple de la passerelle de la Paix qui a beaucoup influencé les architectes du Groupement Rayon Vert et l'importance de la qualité plastique de la structure. En ce qui concerne les délais les points importants sont : le phasage particulier du projet et l'étalement de la durée des travaux.

Les impacts environnementaux à souligner pour le projet concernent le choix de matériaux durables et produits localement, et le choix des installations et du système constructif.

Les risques majeurs pour le projet concernent les périodes de construction et les arrêts de travail répétitifs sur le chantier, à cause des phases de construction. Enfin l'analyse du chantier plus en détail montre que le choix de la méthode constructive est déterminant pour réussir à construire une passerelle sur un site autant contraignant, avec une forte contrainte de sécurité due au contexte ferroviaire.

LA CONCEPTION

La définition de l'approche théorique par l'analyse d'un projet existant était essentielle pour pouvoir faire un retour en arrière sur le design de projet et commencer à y intégrer toutes ces contraintes mises en évidence. Il apparaît alors plus logique dans cette optique de conclure cet énoncé théorique sur la conception du projet qui sera en fait la première étape du projet de master.

Au début du projet l'architecte et toutes les personnes impliquées essaient d'anticiper le déroulement du projet en se fixant des objectifs, qu'il faudra respecter et faire évoluer tout au long du projet. Mais cette étape est souvent trop abstraite et les objectifs se perdent au fil des développements un peu trop hâtifs du projet. C'est parce que l'on ne sait jamais vraiment où l'on vas en commençant un projet, qu'il est intéressant de pouvoir regarder en arrière à un certain moment, et analyser la situation par rapport aux objectifs qu'on s'était fixés.

C'est dans l'optique d'un processus itératif qui permet de voir l'impact des choix constructifs sur la totalité du cycle de vie du bâtiment, que l'utilisation de la méthode BIM est intéressante. Le but est d'utiliser une maquette numérique qui permette un design intégré, avec toutes les contraintes qu'on a vu précédemment. L'analyse de chaque étape du cycle de vie sera facilitée par cet outil et on pourra à tout moment anticiper le résultat des choix fait lors de la conception du projet, car la méthode d'intégration des paramètres le permet. Le but n'est pas de simplement critiquer la conception du projet réel mais plutôt de voir comment en partant de la même idée mais avec des critères de conception optimisés et des outils plus intégrés on arrive à un projet différent.

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

- BIELEFELD Bert, 2013. *Project Management architecture*. Basel: Birkhäuser. Collections: Basics. ISBN: 978-3-03821-462-5 (br).
- DEL PICO Wayne J, 2013. *Project control: integrating cost and schedule in construction*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-1-118-13923-3.
- KENSEK Karen M., 2014. *Building information modeling*. London: Routledge. Collections: PocketArchitecture. ISBN: 978-0-415-71773-1 (hbk.).
- DUCRET André, GRIN Claude, 2003. *Architecture en Suisse, Enquête sur une profession en chantier*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, ISBN: 2-88074-577-2.
- Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, Société Suisse des Entrepreneurs SSE, 1998. *Construire Smart*. Basel: Birkhäuser, ISBN: 3-7643-5924-2.
- Centre Suisse d'études pour la rationalisation de la construction CRB, 2013. *Descriptifs et coûts de construction*. Zurich: CRB, ISBN: 978-3-85567-451-0.
- Centre Suisse d'études pour la rationalisation de la construction CRB, 2009. *De l'étude aux descriptifs*. Zurich: CRB, ISBN: 978-3-85567-454-1.
- ZUFFEREY J.B., ROMY Isabelle, 2010. *La construction et son environnement en droit public: éléments choisis pour les architectes, les ingénieurs et les experts de l'immobilier*. Genève: Schulthess, ISBN: 978-3-7255-5993-0.
- COEN Lorette, LAMBELET Carole, 2010. *L'Ouest pour horizon : schéma directeur de l'Ouest Lausannois*. Gollion: Infolio, ISBN: 978-2-88474-165-1.
- GRANGER Véronique, 1998. *La Maîtrise d'Ouvrage et l'exercice de programmation: modalités d'organisation et d'assistance*. Plan Urbanisme - Construction Architecture. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, ISBN: 2 11 08 55 94.0.

Sitographie

- <http://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=14> (article consulté le 26/12/2014).
- <http://www.vd.ch/themes/environnement/developpement-durable/agenda-21-cantonal/actions-des-services/dfire-sipal/energie-et-environnement/eco-construction/> (article consulté le 20/12/2014).

Fichiers téléchargés

- Chavannes-près-renens, Crissier, Écublens, Renens, État de Vaud, CFF, TL, avril 2013. *Ouest Lausannois, Aperçu du projet, secteur gare de Renens, Interface des transports publics de l'Ouest Lausannois.*
- WIDMER Ariane, décembre 2007. *Secteur gare Renens, Ouest lausannois : interface des transports publics : chantier 2, secteur Bussigny à Sébeillon, rapport du jury du concours : Chavannes-près-renens, Crissier, Ecublens, Renens, Etat de Vaud, CFF, TL.* Renens: Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois.
- Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois, État de Vaud, PALM Agglomération Lausanne - Morges, Chavannes-près-renens, Crissier, Ecublens, Renens, CFF, TL, mai 2013. *Une gare pour l'Ouest.*
- Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois, décembre 2009. *Secteur gare Renens, Ouest lausannois : interface des transports publics, avant-projet «rayon vert» / lot 3 : Chavannes-près-renens, Crissier, Ecublens, Renens, Etat de Vaud, CFF, TL.* Renens: Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois.
- Bureau du Schéma directeur de l'Ouest Lausannois, État de Vaud, Chavannes-près-renens, Crissier, Ecublens, Renens, septembre 2012. *Gare de Renens, avancement des études du préavis intercommunal pour la rénovation urbaine des espaces publics, présentation pour le Conseil Communal de Chavannes-près-renens.*
- UTP, Union des transports publics, 2012. *Rapport du Colloque spécialisé installations électriques ferroviaires*, Berne.
- SBB CFF FFS, 2012. *Je me protège!, Sécurité sur et aux abords des voies*. Berne: CFF, Infrastructure risque, sécurité, environnement, qualité.
- MELLY Samuel, 2013. *Rapport technique / domaine du génie-civil, travaux CFF*. Techni.ch
- Entreprise DIC SA Ingénieurs, 2011-2013. *PDF de présentation du projet de construction*, Aigle.
- BATLOGG Thomas, EGGER Petra, décembre 2012. *Dimension, Construire en béton: polyvalence et spécificité*. Holcim (Suisse) SA.
- Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, 2004. *Recommandation SIA 112 / 1, Construction durable - Bâtiment*. Muttenez: SIA Zurich.
- INGENI SA, mars 2014. *Passerelle Rayon Vert, Étapes de construction avec zones d'installation de chantier*, 1:500. Dossier de plans pour soumission.
- SINTZEL Barbara, MOSBACHER René, 2014. *Les instruments de planification eco-bau*, 1.14. Savoir-faire: CRB-Bulletin.
- Groupement rayon vert: FARRA&FAZAN Architectes, TEKHNE sa Management, L'Atelier du paysage sarl, avril 2009. *Secteur gare Renens: interface des transports publics de l'ouest Lausannois, Étude de contexte*. Schéma directeur de l'Ouest Lausannois, chantier 2: Chavannes-près-renens, Crissier, Ecublens, Renens, Etat de Vaud, CFF, TL.

- Département des finances et des relations extérieures, Service Immeubles, Patrimoine et Logistique SIPAL, juillet 2012. *Code des Frais de Construction CFC A1.51*. Lausanne: État de Vaud.
- OFEV Office fédéral de l'environnement, 2011. *Directive sur le bruit des chantiers*. Berne: L'environnement pratique: Bruit: n° 6, Confédération Suisse.

Iconographie

- page 4 : pdf p. 8, fronts urbains structurants et infrastructures, Étude de contexte, 2009.
- page 9 :
 - image 1 : pdf p. 9, présentation BIM, *Sur la production intégrée*, professeur P. Cutellic, UEB EPFL, 2014.
 - image 2 : pdf p. 25, présentation pour le Conseil Communal de Chavannes-près-renens, septembre 2012.
- page 10 :
 - image 1 : livre p. 44, L'Ouest pour horizon : schéma directeur de l'Ouest Lausannois, 2010.
 - image 2 : pdf p. 11, Ouest lausannois : interface des transports publics : chantier 2, rapport du jury du concours, décembre 2007.
- page 13 :
 - image 1 : carte des zones d'affectations réalisée à partir des données cartographiques du site <http://www.geoplanet.vd.ch/>.
 - image 2 : pdf p. 4, Une gare pour l'Ouest, mai 2013.
- pages 14 et 15 : pdf p. 27, Ouest lausannois : interface des transports publics : chantier 2, rapport du jury du concours, décembre 2007.
- page 16 :
 - image 1 : pdf p. 2, Ouest Lausannois, Aperçu du projet, secteur gare de Renens, avril 2013.
 - image 2 : pdf p.
- page 18 et 19 : pdf p. 20, présentation pour le Conseil Communal de Chavannes-près-renens, septembre 2012.
- page 21 :
 - image 1 : pdf p. 51, Ouest lausannois : interface des transports publics, avant-projet «rayon vert» / lot 3, décembre 2009.
 - image 2 : pdf p. 6, Une gare pour l'Ouest, mai 2013.
- pages 22 et 23 : pdf p. 51, Ouest lausannois : interface des transports publics, avant-projet «rayon vert» / lot 3, décembre 2009.
- page 24 :
 - image 1 : site internet du Bureau Farra & Zoumboulakis architectes : <http://farralakis.ch/index2.html>
 - image 2 : pdf p. 62, Ouest lausannois : interface des transports publics, avant-projet «rayon vert» / lot 3, décembre 2009.

- page 27 : pdf p. 8, Ouest Lausannois, Aperçu du projet, secteur gare de Renens, avril 2013.
- page 28 : livre p. 83, BIELEFELD Bert, Project Management architecture, 2013.
- page 31 :
 - image 1 : site le Temps.ch ,<http://www.letemps.ch/interactive/2014/chantiers-geneve-internationale/#Chapitre1> (consulté le 06/11/2014).
 - image 2 : site de la ville de Genève, <http://www.ville-geneve.ch/actualites/detail/article/1336461821-montage-passerelle-secheron-nations-travaux-spectaculaires-voir-actuellement/> (consulté le 06/11/2014).
 - image 3 : pdf p. 15, BATLOGG Thomas, *Dimension*, Construire en béton, Holcim (Suisse) SA,décembre 2012.
 - image 4 : pdf p. 14, BATLOGG Thomas, *Dimension*, Construire en béton, Holcim (Suisse) SA,décembre 2012.
- page 32 :
 - image 1 : pdf p. 53, Ouest lausannois : interface des transports publics, avant-projet «rayon vert» / lot 3, décembre 2009.
 - image 2 : pdf p. 11, présentation BIM, *Standards de projet*, professeur P. Cutellic, UEB EPFL, 2014.
- page 35 :
 - image 1 : pdf p. 8, Ouest Lausannois, Aperçu du projet, secteur gare de Renens, avril 2013.
 - image 2 : site Eco-Bau, <http://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=14> (consulté le 20/12/2014).
- page 38 : tableau inspiré de la méthode ALARP, site Health and Safety Executive, <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpglance.htm> (consulté le 02/01/2015).
- page 41 :
 - image 1 : pdf p. 34, Ouest lausannois : interface des transports publics, avant-projet «rayon vert» / lot 3, décembre 2009.
 - image 2 : inspiré du diagramme du livre p. 291, BIELEFELD Bert, Project Management architecture, 2013.
- pages 42 et 43 : pdf, INGENI SA, *Passerelle Rayon Vert*, Dossier de plans pour soumission, 1:500, mars 2014.
- page 46 : site SDM protect, <http://www.sdm-protect.com/panneaux-interdiction-31.htm> (consulté le 02/01/2015).
- page 47 : site de la Tribune de Genève, <http://www.tdg.ch/geneve/actu-genevoise/Passerelle-SecheronNations-nuit-agitee-audessus-des-voies-ferrees/story/11513725> (consulté le 02/01/2015).