



Rapport final

Présentation et synthèse

Auteur : Michel Moussard

Octobre 2015

AGENCE DE
RECHERCHE



Programme Bâtiments
et Villes Durables

PARTENAIRES



SOMMAIRE / TABLE DE MATIERES

1. STRUCTURE DU RAPPORT FINAL.....	3
2. SYNTHÈSE	3
2.1. Etat de l'art	4
2.2. Aspects juridiques.....	6
2.3. Jeux d'acteurs	6
2.4. Outils de diagnostic et d'évaluation - Analyse fonctionnelle	7
2.5. Réponses du génie civil urbain aux fonctions et contraintes des couvertures	10
2.5.1. Typologie, analyse et évaluation des structures lourdes.	10
2.5.2. Typologie, analyse et évaluation des couvertures légères.....	12
2.5.3. Interface dessus-dessous, aspects techniques et réglementaires	13
2.5.4. Modules environnementaux et végétalisation	15
2.5.5. Synthèse : inventaire des réponses aux fonctions attendues	16
2.6. Conclusion	16
3. ACTIONS DE VALORISATION.....	17
3.1. Séminaires	17
3.2. Communications et publications.....	19

1. STRUCTURE DU RAPPORT FINAL

Le rapport final du projet CANOPEE est constitué :

Du présent document de présentation et de synthèse

De cinq volumes correspondant aux 5 tâches du projet (les rapports des tâches 1 et 5 sont divisés en cahiers):

Premier volume : Tâche 1 : Recherche et compilation des études et projets antérieurs – Analyse et synthèse de la documentation réunie

Cahier 1 : Etat de l'art - présentation

Cahier 2 : Inventaires raisonné de réalisations antérieures

Fichier Excel : base de données des opérations de couverture

Deuxième volume : Tâche 2 : Couverture urbaine - enjeux juridiques

Troisième volume : Tâche 3 : Analyse des jeux d'acteurs

Quatrième volume : tâche 4 : Mise au point d'outils de diagnostic et d'évaluation

Cinquième volume : tâche 5 : Approche globale et innovante de la conception technique et de la réalisation des couvertures

Cahier 1 : Guide de lecture et synthèse de la tâche 5 et enchaînement avec la tâche 4 ;

Cahier 2 : Retour d'expérience sur les couvertures réalisées dans le cadre de la ZAC Paris Rive Gauche ;

Cahier 3 : Typologie, analyse et évaluation des structures lourdes ;

Fichier Excel : analyse de la réponse des structures lourdes

Cahier 4 : Typologie, analyse et évaluation de structures légères ;

Cahier 5 : Interface dessus-dessous – aspects règlementaires et contraintes technique ;

Cahier 6 : Modules d'aménagements environnementaux ;

Cahier 7 : « Focus » sur la végétalisation

2. SYNTHÈSE

Les infrastructures routières ou ferroviaires en milieu urbain génèrent des nuisances visuelles, acoustiques et atmosphériques, et de profondes coupures dans le tissu urbain. Pour pallier cette situation, il y a essentiellement deux approches possibles. La première, qui en fait ne s'applique qu'aux infrastructures routières, consiste à transformer ou retransformer la voie rapide en boulevard urbain, avec aménagement paysager et éventuellement mise en place d'un TCSP (exemples : Boulevard des Maréchaux à Paris, ancien Boulevard Périphérique de Lyon). La seconde consiste à couvrir l'infrastructure par une dalle assurant à la fois la protection contre les nuisances et la continuité urbaine (exemples : couvertures du Boulevard Périphérique à Paris, couverture du faisceau des voies d'accès à la Gare d'Austerlitz – ZAC Paris Rive Gauche). C'est dans cette deuxième approche que nous nous sommes situés, non sans nous être interrogés sur sa pertinence dans le contexte général du « projet urbain ».

Outre leur capacité à réduire les nuisances, ces couvertures constituent des opportunités dans le cadre des stratégies d'urbanisme, des politiques foncières, du logement, des transports et du développement des activités

économiques en milieu urbain dense. La création d'ouvrages de couverture d'infrastructure induit la création de sol artificiel accessible à des usages publics et privés. L'ouvrage peut se voir lié à la construction d'immeubles en superstructure, ce qui multiplie les sujétions de fonctionnement et d'usage des différents volumes bâtis. La prise en compte de l'expérience issue des « quartiers sur dalles » des années 1960-1970 ou des opérations de couverture plus récentes permet de mieux appréhender les difficultés de gestion et d'entretien propres à l'intrication tridimensionnelle des usages et des propriétés.

Ces couvertures sont des ouvrages complexes de génie civil urbain, réalisés dans des conditions difficiles du fait de l'encombrement des sites concernés et de la nécessité dans la plupart des cas de maintenir l'exploitation des voiries concernées pendant phase de réalisation. Elles n'ont toutefois jamais fait l'objet de réglementations ou de recommandations spécifiques, alors qu'elles constituent un type d'ouvrage particulier : ce ne sont ni des ponts, ni des tunnels, ni des bâtiments, ni des voiries, mais tout cela à la fois, notamment si l'on considère leur capacité à supporter des bâtiments, des voiries, ou des aménagements paysagers. Ceci a conduit à les décomposer en différentes parties (infrastructures, équipements, aménagement de surface, bâtiments) traitées parallèlement les unes aux autres, en appliquant des réglementations plus ou moins cohérentes entre elles, et en gérant tant bien que mal les interfaces, aussi bien d'un point de vue architectural et technique que d'un point de vue politique, contractuel et juridique. Or les interactions sont fortes et surtout le processus de gestion de projet est fondamental.

Cette absence de vision globale, de démarche systémique, d'outils de programmation et de conception et d'analyse des risques spécifiques, nuit certainement à l'utilisation optimale de ce concept pour le renouvellement urbain, alors qu'il recèle un potentiel considérable au vu de l'importance des surfaces occupées par les grandes infrastructures de transport dans les grandes agglomérations.

Il est symptomatique de constater qu'il n'existe ni désignation ni acronyme spécifique pour ce type d'ouvrage ; nous les désignerons ici sous le nom de couvertures. Il convient de préciser que même s'il y a beaucoup de similitudes, il ne s'agit pas ici de traiter de l'urbanisme de dalle, même si l'on se situe bien dans la dimension verticale de la ville.

Devant cette absence d'études et de documentation sur ce type d'ouvrage, le projet Canopée s'est donné comme objectifs :

- d'établir dans un premier temps un état de l'art de ces ouvrages, en regroupant au sein d'une base de données une large documentation sur les réalisations remarquables en France, en Europe et dans le Monde : ce travail a été réalisé dans le cadre de la tâche 1, pilotée par l'EIVP.
- D'examiner les aspects juridiques du développement de ces projets, en particulier sous l'angle de la propriété, avec l'apparition de la division en volumes : ce travail a été réalisé dans le cadre de la tâche 2 par l'Université Paris-Est, établissement de Créteil.
- D'examiner comment les interactions fortes qui existent entre le projet d'infrastructure d'une part et le projet urbain d'autre part (le « dessous » et le « dessus ») se traduisent au niveau des jeux d'acteurs entre maîtres d'ouvrage et concessionnaires : ce travail a été réalisé dans le cadre de la tâche 3 par l'Université Paris-Est, établissement de Marne-la-Vallée.
- D'analyser de façon systématique et rationnelle les fonctions de cet objet « couverture », défini ici comme l'ouvrage de génie civil proprement dit : ce travail a été réalisé dans le cadre de la tâche 4 par l'Université Paris-Est, établissement de Marne-la-Vallée.

- De rechercher sur la base des travaux des 4 premières tâches quelles réponses l'ingénierie et l'industrie du Génie Civil peuvent apporter aux problématiques propres à ces ouvrages : ce travail a été piloté et réalisé dans le cadre de la tâche 5 par Egis, en collaboration avec ARCADIS et Tecomah.

Le pilotage global du projet et la synthèse ont été réalisés par ARCADIS.

Les autres membres du groupement, qui ont apporté leur concours et leur expertise, mais n'ont pas été directement impliqués dans les travaux de recherche, sont la Ville de Paris et l'IREX. Le CETU, qui ne faisait pas partie du groupement et n'avait pas de convention avec l'ANR, est aussi intervenu en tant que conseil.

Ce projet a été retenu par l'ANR dans le cadre du programme Villes et Bâtiments Durables en 2011, et lancé en janvier 2012. Il s'est terminé fin Octobre 2015.

2.1. Etat de l'art

La première tâche, c'est-à-dire la revue analytique d'opérations de couvertures réalisées dans plusieurs continents, a été coordonnée par l'EIVP, sous la direction de Laurent Ducourtieux. Un jeune ingénieur d'étude, Brice Chandon, a travaillé deux ans dans l'Ecole pour établir une base de données qui détaille plus de cent opérations de ce genre, réalisées le plus souvent en France mais aussi en Europe, en Amérique du Nord et en Australie (Melbourne).

Il ne s'agissait pas pour nous d'être exhaustif, même si le récolement avec la base de données du Centre d'études des tunnels a montré que, pour la France, nous avons semble-t-il repéré à peu près toutes les couvertures de plus de 300 m de long. Notre objectif était de comparer ces opérations entre elles, afin de savoir si nous pouvions en distinguer des catégories.

Après examen de nombreux cas très différents les uns des autres, nous avons pu confirmer que les couvertures de voiries majeures se présentent bien comme une réponse urbanistique particulière face à un problème de développement urbain à plusieurs dimensions. Trois questionnements en particulier sont apparus déterminants dans la décision de couvrir ou pas, qui sont partiellement indépendants les uns des autres :

- Il y a tout d'abord la question de l'usage de l'infrastructure majeure qui traverse le site : veut-on maintenir un trafic intense voire l'augmenter, ou veut-on déclasser la voie, et réduire voire supprimer le trafic ? La réponse à cette question est déterminante pour le choix de couvrir ou non.
- Il y a ensuite la nature du développement immobilier envisagé sur ce site. Dispose-t-on de foncier non bâti sur les rives de la voie ? Peut-on valoriser un sol artificiel ? La densité humaine nette, l'intensité urbaine visée justifient-elles qu'on limite les nuisances de la voie ?
- Il y a enfin la configuration topographique du site, favorable ou non à une opération de génie civil. Une voie existante en tranchée se prête bien à une opération de couverture, dont le dessus viendra naturellement se situer au niveau des voiries et terrains adjacents. Par contre lorsque l'infrastructure de transport se trouve au niveau des voiries adjacentes, l'opération de couverture ne peut s'insérer dans le tissu urbain qu'au prix d'aménagements importants de part et d'autre. Nous avons toutefois constaté, à travers l'analyse de notre base de données, que le retour d'expérience de quelques projets emblématiques, comme le quartier de Paris Rive Gauche ou

l'opération de Sijtwende en Hollande, ont montré que la couverture d'infrastructures routières ou ferroviaires situées au niveau du sol était tout à fait possible et pouvait conduire à des aménagements urbains d'une grande qualité, à condition que l'opération puisse être étendue de part et d'autre de la voirie couverte. Des études récentes menées par l'Agence Devillers pour la couverture du Boulevard Périphérique dans le secteur de la Gare des Minimes ont aussi montré l'intérêt d'une telle approche, qui peut s'avérer, comme c'est le cas dans ce projet, beaucoup plus « réalisable » que le décaissement d'une voirie supportant une circulation intense et stratégique, tout en offrant de réelles opportunités de développement urbain.

L'établissement de la base de données et son analyse ont aussi confirmé – s'il était nécessaire – les différences fondamentales qui existent entre les projets de couverture de voiries routières et ceux de voiries ferroviaires. En premier lieu vis-à-vis de l'opportunité de couvrir et des alternatives possibles. Il apparaît en effet que, dans le cas d'infrastructures ferroviaires, le déclassement soit rarement envisageable, en particulier dans les grandes agglomérations où l'accès des grandes lignes en centre-ville est un facteur essentiel de la mobilité durable. Il est intéressant à ce propos de rappeler qu'un débat a été ouvert à Paris sur l'opportunité de renvoyer au-delà du Boulevard Périphérique les gares « grandes lignes », débat qui s'est conclu par le maintien de ces gares intra-muros, malgré l'énorme potentiel urbain et immobilier que représentent les emprises des grandes lignes qui convergent dans Paris. Pour simplifier on peut dire que pour l'infrastructure ferroviaire il n'y a que deux alternatives, la supprimer, ce qui est rarement faisable ni souhaitable en milieu urbain dense, ou la maintenir quasiment en l'état, tout en tenant compte des projets à venir, alors que pour les infrastructures routières il y a une grande variété de solutions, dans un contexte globalement peu favorable au maintien de la circulation automobile en ville, du moins aux niveaux d'intensité et de vitesse actuels. Ces deux modes de transport se distinguent aussi très nettement, vis-à-vis des projets de couverture, par les contraintes qu'ils génèrent, qu'il s'agisse des contraintes d'exploitation, notamment en phase de construction, ou des contraintes liées à la sécurité dans les tunnels, qui sont fixées par des réglementations différentes.

Notre travail de recherche documentaire nous a aussi conduits à nous intéresser aux projets et aux recherches hollandais. Trois projets ont particulièrement retenu notre attention :

- L'insertion de la Route 14 à la Haye (tunnel de Sijtwende), où un partenariat public-privé basé sur la mutualisation d'une opération de développement d'une voie rapide et d'un programme de logements ont permis la conception intégrée de l'infrastructure et de son environnement urbain, dans le contexte de la couverture d'une voirie située au niveau du terrain naturel.
- L'« Utrechtse Baan », projet de couverture de l'autoroute A 12 à La Haye. Cinq immeubles-ponts et une couverture partielle sont répartis en entrée de ville au-dessus de l'autoroute A12 qui traverse la ville en tranchée, sur 1,2 km. L'autoroute arrive jusqu'au cœur de la ville dans des espaces à forte pression foncière. Dans ce quartier tertiaire, les différentes opérations, indépendantes, permettent de jalonner le parcours des automobilistes et de favoriser la continuité du tissu urbain.

Figure 1 : couverture de l'A12 à la Haye



- La couverture des voies routières et des voies ferrées du nouveau quartier de Zuidas au Sud d'Amsterdam, quartier d'affaires situé à proximité de l'aéroport international de Schiphol, traversé par l'Autoroute A10 et un faisceau de voies ferrées. Projet doublement intéressant, par son ampleur d'une part, et par les jeux d'acteurs auquel il a donné lieu. Le projet initial, qui prévoyait la couverture totale des voies routières et ferroviaires, et la construction d'immeubles au-dessus des voies couvertes, sur financement privé des infrastructures dans le cadre des opérations immobilières prévues, a dû être abandonné à la suite de la crise dite des « subprimes ». Après une concertation étroite entre les acteurs publics et privés, dans la tradition du « Dutch dialogue », un projet plus modeste a été retenu, avec couverture des voies routières seulement, sous financement public, la couverture des voies ferroviaires et la construction d'immeubles étant remises à plus tard.

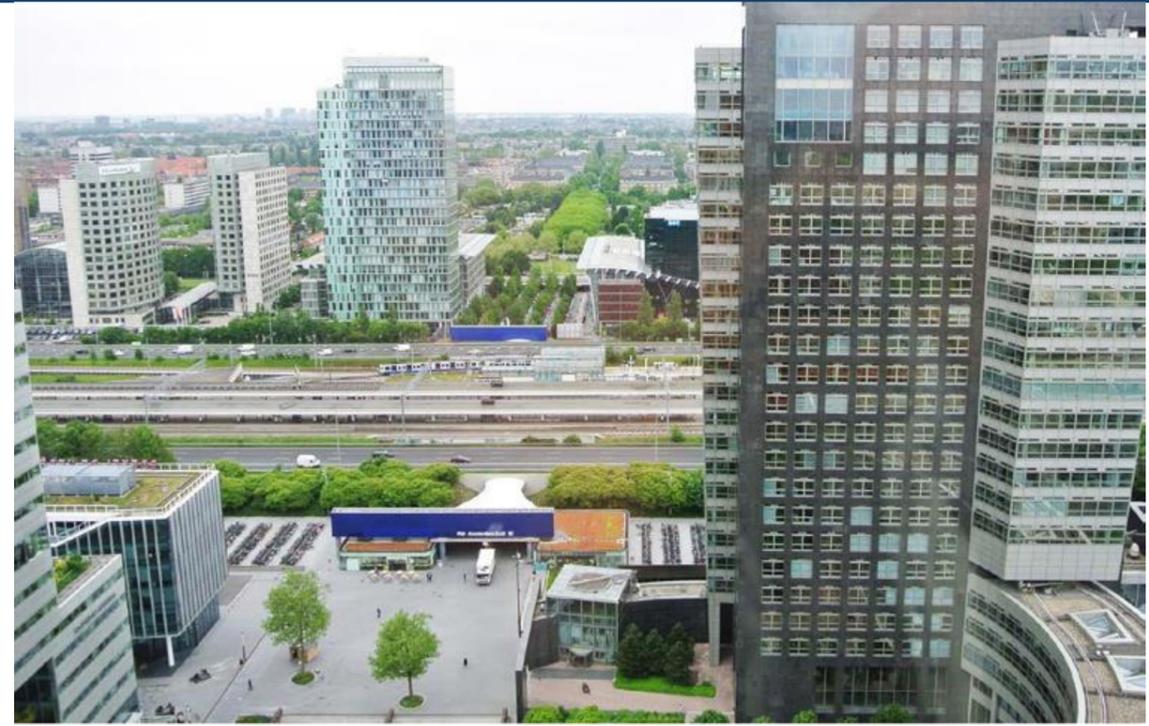


Figure 2 : le site de « Zuidas », au Sud d'Amsterdam

Dans le cadre d'un voyage d'études en Hollande nous avons entamé des échanges fructueux avec Bert van Eekelen, urbaniste et chercheur, auteur d'un ouvrage récemment publié sur le projet de Zuidas. Nous avons pu aussi prendre connaissance d'un travail de recherche très abouti sur le développement de projets immobiliers au-dessus de faisceaux ferroviaires urbains, dont les résultats ont été publiés par Sebastiaan de Wilde dans son ouvrage intitulé *Rail Estate*.

Enfin dans le cadre des enquêtes menées pour les différentes tâches, nous avons eu de nombreux contacts avec la SEMAPA pour le projet Paris Rive Gauche, qui illustre par son ampleur et sa variété tout le potentiel des couvertures d'infrastructures en milieu urbain, et est devenu le projet de référence de notre travail de recherche. Dans le cadre de la tâche 5, un important travail de compilation des différentes solutions techniques mises en œuvre dans le cadre des couvertures du faisceau des voies issues de la Gare d'Austerlitz a été réalisé par Pierre Foqué d'Egis ; ce travail vient compléter les travaux de la tâche 1.

2.2. Aspects juridiques

Les réflexions sur les aspects juridiques des projets de couverture, dirigés par le Pr Rozen Noguellou, et réalisés par Laura Preud'homme, doctorante, ont été menées sur la base d'enquêtes et d'analyse relatives à quatre projets : Paris Rive Gauche, la dalle des Olympiades à Paris, la couverture du Boulevard Périphérique Porte des Lilas, et la ZAC des Batignolles à Paris. Les projets de couverture, compte tenu de la superposition des ouvrages et des fonctions, soulèvent un certain nombre de problèmes juridiques particuliers, notamment en ce qui concerne le partage de la propriété et la gestion contractuelle des opérations.

Le partage de la propriété est essentiellement un partage en volume (notion introduite historiquement dans le cadre du projet de la Défense), entre le propriétaire de la voirie couverte, celui de la dalle et éventuellement celui des immeubles construits au-dessus de la dalle. La dalle elle-même peut faire l'objet d'une division en surface. Deux projets illustrent particulièrement les problèmes rencontrés, la dalle des Olympiades d'une part et Paris Rive Gauche d'autre part. La dalle des Olympiades ressort en fait de l'urbanisme de dalle plus que de la couverture d'infrastructure de transport, mais illustre les difficultés potentielles d'une approche du partage de la propriété qui a consisté à donner la propriété de la dalle aux propriétaires des immeubles, dans le cadre de copropriétés. Ces propriétaires n'ayant pas la capacité financière ni la structure nécessaire pour faire face à l'entretien de la dalle, celle-ci n'est pas entretenue, ce qui conduit à une situation de dégradation progressive non résolue à ce jour. A l'autre extrémité du spectre, dans le cadre du projet Paris Rive Gauche, compte tenu de son ampleur et de sa durée, les acteurs ont pu mettre en place une approche élaborée du partage de la propriété entre RFF, propriétaire de l'infrastructure et des appuis de la dalle, la SEMAPA, propriétaire des surfaces de dalle destinées à l'espace public, et les propriétaires des immeubles, publics ou privés, qui sont aussi propriétaires des dalles situées au droit de leurs immeubles. Au démarrage du projet la propriété de certaines dalles a été partagée dans l'épaisseur entre RFF pour le dessous et la SEMAPA pour le dessus, mais cette disposition a été abandonnée. Comme cela est le cas dans des situations plus courantes, les interfaces entre propriétés donnent lieu à des servitudes.

En ce qui concerne les montages contractuels, on distingue en premier lieu les montages avec maîtrise d'ouvrage publique et ceux avec maîtrise d'ouvrage privée. Dans le premier cas on se situera dans le cadre d'un marché public de travaux, régi par le Code des Marchés Publics et la loi MOP. Ce cadre, bien connu et bien maîtrisé par les maîtres d'œuvre publics, peut présenter deux inconvénients : d'une part il nécessite le financement public de l'ensemble de l'opération, d'autre part il ne facilite pas la prise en compte dans le projet de l'ensemble des complexités techniques, notamment de réalisation – à moins toutefois de recourir au marché de conception-construction. D'où le recours à des montages sous maîtrise d'ouvrage privée, avec quatre options disponibles : la concession de travaux, le contrat de partenariat public-privé, le bail emphytéotique administratif et la concession d'aménagement, qui présentent l'intérêt de reporter tout ou partie du financement sur le maître d'ouvrage privé, et de lui imposer une logique de performance constructive et économique. La concession de travaux, qui suppose la rémunération du co-contractant (le maître d'ouvrage privé) par un péage, n'est pas adaptée à ce type de projet. On voit mal en effet l'installation d'un péage pour traverser le Boulevard Périphérique ou l'Avenue de France ! Le choix entre les trois autres solutions dépend du type de projet. Le partenariat public privé suppose des conditions particulières de complexité ou d'urgence. La concession d'aménagement s'impose

lorsque la cession de bien fait partie du processus, et apparaît comme la solution la mieux adaptée en général.

2.3. Jeux d'acteurs

Dans le prolongement des réflexions sur les montages contractuels des projets de couverture, les travaux de la tâche 3, engagés par Joël Idt et Stéphanie Leheis (Université Paris Est, Lab'Urba, département Génie Urbain), portent sur l'analyse organisationnelle des modes de pilotage de ces projets. L'objectif est de mettre en lumière la façon dont les acteurs s'organisent, et de repérer les principales difficultés en termes de coordination dans l'action collective. Il ne s'agit pas de définir une organisation idéale, donnant les clés d'une coordination réussie entre les acteurs, et à ce titre il est important de rappeler d'emblée qu'il n'existe pas d'organisation «idéale» d'un projet, chaque projet appelant une organisation spécifique. En revanche, cette analyse vise à apporter un éclairage sur les problèmes et les difficultés de coordination, ce qui permettra aux acteurs de repérer des points de vigilance pour la mise en œuvre de tels projets.

Lors de la réalisation d'une couverture, plusieurs acteurs, ayant chacun une action à réaliser, des compétences et des savoirs, doivent agir ensemble pour construire un objet. Entre celui qui construit la dalle de couverture, celui qui en aménage la surface, ou celui qui gère l'infrastructure du dessous, les acteurs impliqués sont dans une situation d'interdépendance où les actions de l'un impactent celles de l'autre. Il s'est agi dans cette tâche de questionner les coopérations entre les acteurs, et de repérer les dispositifs qu'ils peuvent mettre en œuvre pour organiser cette coopération. Sur ce point, la sociologie des organisations et de l'action publique fournit des pistes de réflexions pour mettre en lumière la façon dont les acteurs agissent dans une situation d'action collective. Le cadre d'analyse qui en découle permet de comprendre les situations d'interdépendances entre les acteurs, les stratégies que les acteurs peuvent mettre en œuvre dans ce contexte, et les dispositifs construits pour régir ces situations d'interdépendance et organiser l'action collective.

Chacun des projets étant le plus souvent porté par des acteurs différents, appartenant à des corps professionnels distincts, c'est aux interfaces que l'on retrouve les principales difficultés d'action collective, avec des acteurs qui s'inscrivent chacun dans une démarche de projet, qui ont donc un calendrier et des contraintes propres, ne parlent pas forcément le même langage, mais sont amenés à se coordonner pour gérer l'articulation entre les multiples dimensions du projet de couverture.

Les caractéristiques techniques de la couverture (longueur, largeur, portance, matériaux, etc.) ont un rôle structurant sur les jeux d'acteurs et sur les modalités de coordination entre les acteurs. Des contraintes fortes s'imposent sur cet objet, en particulier celles liées à la sécurité de l'ouvrage et à sa réalisation, de sorte que la couverture peut être considérée comme un ouvrage d'art coûteux et complexe. Les choix techniques qui sont faits, par exemple sur le type de couverture, sont ensuite déterminants pour les options d'aménagement en surface. Les jeux d'acteurs s'en trouvent modifiés et fortement contraints. Ainsi, les acteurs qui aménagent la dalle en surface doivent souvent faire face à des contraintes imposées par les caractéristiques de la dalle, sur lesquelles il n'est pas toujours possible de revenir. Les modalités de coordination entre les acteurs sont ainsi en partie déterminées par les caractéristiques techniques de l'ouvrage. L'analyse met en lumière le poids de ces caractéristiques techniques et les marges de manœuvre sur lesquelles les acteurs peuvent jouer pour se coordonner.

Le dispositif d'enquête s'appuie sur plusieurs études de cas. Trois cas exploratoires ont d'abord été analysés, de façon à tester et préciser la grille d'analyse : la réalisation de la rocade L2 à Marseille, la couverture de l'A6 dans le Val de Marne, et la couverture du Boulevard Périphérique, Porte des Lilas à Paris.

Ces études de cas exploratoires ont permis par exemple de mettre en lumière la multiplicité des logiques qui justifient un projet de couverture d'infrastructure : réduire les nuisances, créer du foncier, réorganiser un quartier en supprimant une coupure urbaine, repenser des flux de transport en les enterrant (pour en augmenter la vitesse en toute sécurité par exemple), etc. On observe au minimum une combinaison de deux stratégies : l'une liée aux transports, et qui concerne l'infrastructure du dessous (ce qu'elle apporte en terme d'amélioration des circulations, et son inscription dans une politique de transport pensée à l'échelle métropolitaine et pas seulement locale), l'autre liée à l'aménagement urbain (relative au traitement des dalles et à leur articulation par rapport à l'espace urbain).

A la suite de cette étude exploratoire, une enquête de terrain et une analyse détaillée et comparative de cinq cas de couvertures a été menée : la couverture des voies ferrées existantes au sortir de la gare d'Austerlitz dans la ZAC Paris Rive Gauche, l'élargissement d'une partie du réseau ferroviaire autour de Bruxelles accompagné par endroit de portions de couvertures, la couverture d'une voie rapide urbaine et la réalisation d'une ligne de tramway en surface à Karlsruhe, l'enfouissement de l'A55 à Marseille dans le cadre du projet Euroméditerranée, la réalisation en tranchée couverte d'une section de voie rapide à Gennevilliers. Le choix des projets répond à une exigence de travailler sur plusieurs types de couverture, pour lesquelles les interactions entre l'ouvrage d'art et son environnement urbain sont particulièrement fortes.

Les analyses de terrain ont donné lieu d'abord à un travail sur les données bibliographiques, techniques, cartographiques, etc. relatives aux projets sélectionnés, de façon à repérer les caractéristiques principales de ces projets et les acteurs impliqués. Ensuite des entretiens ont été réalisés auprès des acteurs du projet. Le panel des interviews comprend des acteurs de la maîtrise d'ouvrage comme de la maîtrise d'œuvre, des acteurs concernés par l'infrastructure du dessous, par la dalle ou bien par les aménagements de surface. Deux niveaux d'analyse ont été repérés : le niveau des institutions et des groupes d'acteurs (avec leurs référentiels et univers techniques), et le niveau des individus (pour repérer les systèmes d'acteurs à l'intérieur d'une institution). Au total, une dizaine d'entretiens par étude de cas, représentant un total d'une cinquantaine d'entretiens, a été réalisée.

Finalement, l'analyse a été structurée autour de deux ensembles de questionnements :

- Comment caractériser les interdépendances (physiques, techniques et fonctionnelles, mais aussi politiques, économiques et contractuelles) au sein d'un système comportant la dalle de couverture, l'infrastructure couverte, la surface de la dalle et ses abords ?
- Comment les acteurs agissent-ils dans ces situations d'interdépendance, et comment se coordonnent leurs actions ?

Il n'est pas possible de restituer cette analyse dans toute sa complexité dans le cadre de cet article, et le travail ainsi accompli constitue avant tout un retour d'expérience structuré par une grille analytique, et

ne peut se traduire par des recommandations dans la mesure où il n'y a pas, comme cela a été dit plus haut, d'organisation idéale d'un projet. On retiendra toutefois :

- L'importance des structures intermédiaires auxquelles est confiée la maîtrise d'ouvrage de tout ou partie du projet, afin d'en faciliter la coordination : MPM pour Euromed, KASIG à Karlsruhe, SEMAPA pour Paris Rive Gauche, TUC rail pour le projet RER de Bruxelles.
- L'importance du dialogue entre acteurs, afin d'harmoniser les projets et leurs temporalités propres.
- Le poids des dispositifs de contractualisation, comme cela a été évoqué dans le cadre des aspects juridiques,
- L'intérêt de faire émerger des solutions techniques innovantes, ce qui nécessite la mise en place d'une maîtrise d'œuvre indépendante de la maîtrise d'ouvrage, aussi transversale que possible, afin de promouvoir une vision globale du projet et de concevoir les ouvrages en conséquence.
- L'intérêt évident pour de tels projets, comprenant une multitude d'interfaces et où les dimensions formelles (nivellement, cheminements,...) et structurelles des projets sont des dimensions centrales des négociations, de mettre en place une Maquette Numérique, au sens large de ce terme, c'est-à-dire un ensemble de bases de données interactives et partagées entre tous les acteurs du projet, dès la phase de conception et pour tout le cycle de vie de l'ouvrage.

2.4. Outils de diagnostic et d'évaluation - Analyse fonctionnelle

La multiplicité des acteurs concernés, la considération multi-scalaire et l'intégration de la temporalité, en plus des contraintes contextuelles et techniques, font que la prise de décision dans le cas des couvertures d'infrastructures urbaines est un processus souvent chaotique et trop rarement concerté. L'objectif du travail de recherche mené par Marina Maurin sous la direction de Katia Laffrèchine et Denis Morand (Université Paris-Est – Marne-la-Vallée – équipe de génie urbain du Lab'Urba) dans le cadre de la tâche 4 est de mettre au point des outils et des méthodes d'évaluation qui permettent aux acteurs des prises de décisions mieux fondées et plus cohérentes. Dans ce but un travail de modélisation des couvertures a été engagé.

Les couvertures, interventions urbaines importantes, se confrontent à des problématiques diverses liées au contexte urbain dans lequel elles s'intègrent et principalement aux infrastructures qu'elles recouvrent. Celles-ci, implantées et développées par soucis de mobilité, d'urbanisation et d'accessibilité sont souvent ressenties et décrites localement (par les riverains et/ou usagers de l'espace) comme des « monstres urbains » aussi bien visuels que sonores. Des désagréments relatifs à la pollution atmosphérique et aux vibrations sont aussi largement évoqués. D'un point de vue structurel et technique, l'infrastructure tient lieu de coupure urbaine entre les deux rives qu'elle génère. Celle-ci engendre des difficultés de franchissement des réseaux et une partition morphologique du territoire urbain.

La démarche consiste d'une part à observer et analyser les couvertures d'infrastructures dans leur contexte et environnement urbain immédiat et d'autre part à mener une réflexion théorique, l'enjeu étant de saisir, comprendre et appréhender la complexité des territoires urbains intégrant (ou allant intégrer) ces objets de génie civil au-dessus d'infrastructures de transports routiers ou ferroviaires pour les modéliser et proposer des méthodes et des outils d'évaluation. L'approche méthodologique présentée dans ce document est focalisée sur l'observation et l'analyse de couvertures d'infrastructures urbaines, dont la plupart sont référencées dans la base de données élaborées dans le cadre de la tâche 1 de ce projet.

L'ouvrage de génie civil couverture, recouvrant totalement ou partiellement des voies d'infrastructures de transport, est considéré comme un **objet technique urbain**. La couverture se positionne comme une interface structurelle tridimensionnelle entre un dessus (espace urbain) et un dessous (l'infrastructure de transport) d'une part, et dans le plan horizontal entre les deux rives du dessus d'autre part. La définition de la couverture ne peut donc pas se cantonner à l'étude de l'ouvrage de génie civil. Celle-ci doit intégrer un second périmètre, plus large, correspondant au territoire du projet d'aménagement dans lequel elle s'implante. Deux périmètres importants se dessinent : un périmètre structurel et un périmètre projet. Le premier périmètre, **structurel**, adopte les contours physiques de l'ouvrage de génie civil. Il s'agit de **la couverture** (en rouge, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**3). Le second périmètre correspond au territoire urbain directement concerné par la mise en place de la couverture : les limites de **l'opération d'aménagement** autour de la couverture (à droite, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**3).

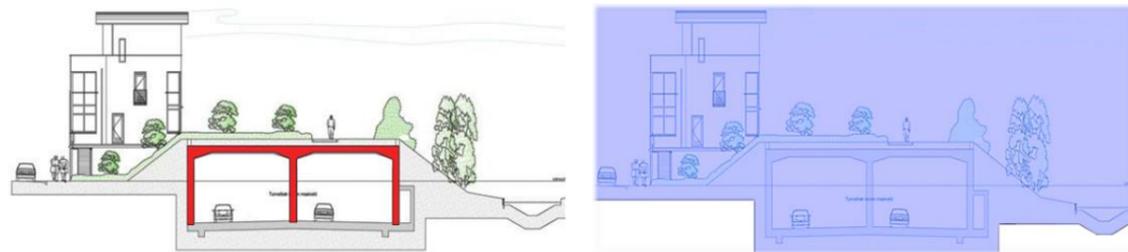


Figure 3 : Les différentes échelles de la couverture d'infrastructures - projet de Sijtwende en Hollande (Marina Fund-Maurin)

Une autre représentation de ces deux périmètres est proposée **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**4. Les périmètres structurel et de l'opération d'aménagement sont représentés schématiquement en plan puis reportés sur l'opération de couverture de la porte des Lilas à Paris.

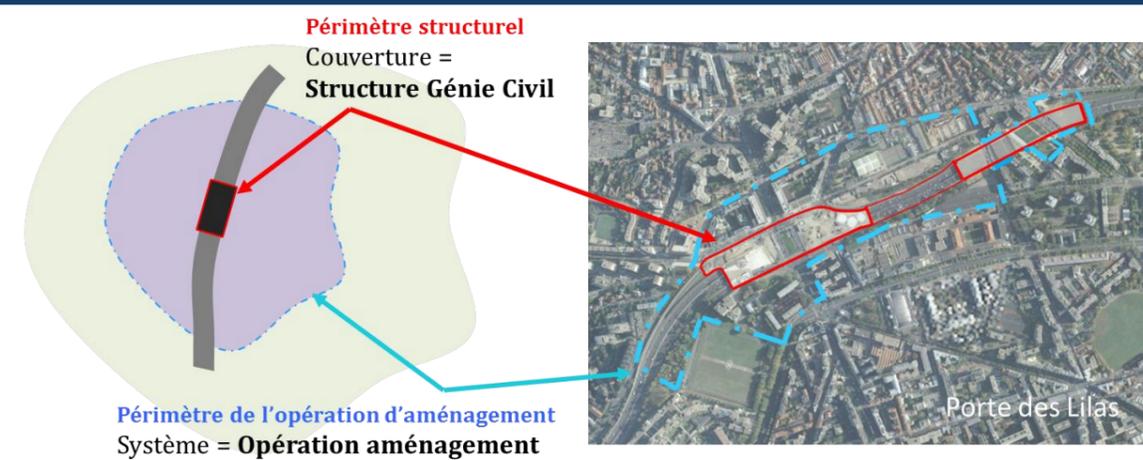


Figure 4 : Les périmètres considérés pour la couverture d'infrastructures (Marina Fund-Maurin)

Le système retenu, dans le cadre de ce projet de recherche, est donc le **système urbain de couverture**, dont le périmètre correspond à l'opération d'aménagement dans lequel vient se greffer la couverture. Ce système est également qualifié d'**environnement** de la couverture.

L'analyse fonctionnelle de la couverture d'infrastructure de transport en milieu urbain vise à proposer un modèle descriptif et structuré **du fonctionnement du système urbain couverture**. Celui-ci doit être intelligible par l'ensemble des acteurs concernés par ces projets particuliers.

L'analyse de la Base de Données de la tâche 1 permet d'identifier clairement que les couvertures sont programmées pour répondre à des problématiques de nuisances (sonores, pollution, coupure urbaine ...). Afin de caractériser clairement ces nuisances, la modélisation du processus nuisance / gêne a été menée en utilisant la méthode NIAM. Cette modélisation fine a permis d'identifier le **conflit** entre le dessus et le dessous. Ce conflit est repris dans l'analyse systémique, il traduit la finalité du système "couverture dans son environnement urbain". L'analyse systémique est conduite par la méthode APTE, méthode par laquelle des fonctions principales et de contraintes sont identifiées et hiérarchisées.

La couverture est soumise à une analyse fonctionnelle externe. Autrement dit, il s'agit de s'intéresser au fonctionnement et au comportement de la couverture dans son environnement. Le choix de centrer la méthode sur l'objet de génie civil présente l'avantage d'identifier l'ensemble du fait de couvrir l'infrastructure sur et dans son environnement. Par ailleurs, du fait de la pérennité de l'ouvrage et des limites spatiales retenues, la phase d'analyse fonctionnelle interne s'apparente à une analyse structurelle de génie civil. Cette phase, dont l'objet est la spécification technique du besoin est une partie du travail de recherche effectué dans la tâche 5 du projet, décrit au chapitre 6.

Il n'est pas possible dans le cadre de cet article de présenter l'analyse fonctionnelle qui a été menée sur la base de la méthode APTE. Nous mentionnerons toutefois la définition des fonctions principales et des fonctions de contrainte identifiées.

Les fonctions principales expriment les interactions, induites par la couverture, entre deux environnements, ou éléments de l'environnement, ou d'un environnement et lui-même.

L'environnement de la couverture, ou espace urbain, a été scindé en quatre environnements: *environnement mobile, environnement équipé, environnement habité, et environnement actif.*

Un **espace urbain** supporte les activités diverses des populations. En se référant à la typologie de populations proposée et aux *supports* associés, une décomposition de l'espace se révèle assez logiquement : un **espace mobile**, un **espace habité**, un **espace actif** et un **espace équipé**. De cette manière chaque type de populations s'appuie sur l'espace associé (population mobile sur l'espace mobile, population riveraine sur l'espace habité, population active sur le territoire actif et population usager sur l'espace équipé) pour exercer son activité (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**5).

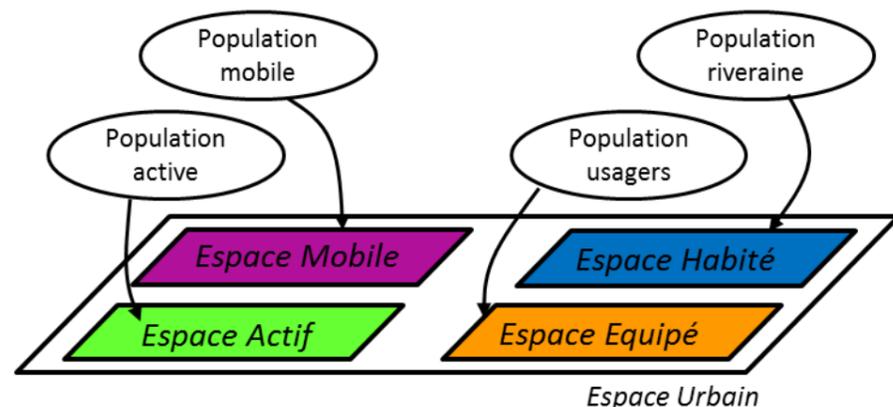


Figure 5 : Déclinaison de l'espace urbain en sous espaces et action des populations associées (Marina Fund-Maurin)

Ces quatre espaces sont bien définis selon une typologie fonctionnelle et non géographique. En ce sens, ils peuvent se juxtaposer spatialement. Cette décomposition se base sur les quatre fonctions urbaines : *Ville mobile, Ville résidentielle, Ville active et Ville équipée.* Précepte adopté, implémenté et utilisé tant de façon méthodologique qu'opérationnelle par l'agence d'urbanisme et de programmation urbaine Alphaville. Ces fonctions font également écho aux travaux de Le Corbusier et notamment aux enseignements de La Charte d'Athènes. En pratique, des études d'impact utilisent également ce découpage en fonctions urbaines pour appuyer leurs expertises. Ce modèle présente l'intérêt d'aborder le territoire et la ville selon une approche fonctionnelle (et systémique) en se basant à la fois sur la composition urbaine et sur les pratiques de la population qui y évolue.

L'étude des interactions entre chacun des quatre environnements via la couverture a permis d'identifier **onze fonctions principales**. Le tableau 1 ci-dessous liste ces fonctions en précisant les environnements extérieurs considérés.

Tableau 1 : Fonctions principales de la couverture d'infrastructure urbaine (Marina Fund-Maurin)

FP	Intitulé de la fonction	Environnement 1	Environnement 2
FP01	Créer une proximité entre espace mobile et espace habité / Assurer l'accessibilité de l'espace habité pour les populations	Environnement mobile	Environnement habité
FP02	Protéger l'espace habité des nuisances environnementales générées par l'infrastructure	Environnement mobile	Environnement habité
FP03	Créer une proximité entre espace mobile et espace actif / Assurer l'accessibilité de l'espace actif pour les populations	Environnement mobile	Environnement actif
FP04	Protéger l'espace actif des nuisances environnementales générées par l'infrastructure	Environnement mobile	Environnement actif
FP05	Créer une proximité entre espace mobile et espace équipé / Assurer l'accessibilité de l'espace équipé pour les populations	Environnement mobile	Environnement équipé
FP06	Créer une proximité entre espace mobile et espace mobile / Assurer l'accessibilité de l'espace mobile pour les populations	Environnement mobile	Environnement mobile
FP07	Protéger l'espace mobile des nuisances environnementales générées par l'infrastructure	Environnement mobile	Environnement mobile
FP08	Créer une proximité entre espace habité et espace équipé	Environnement habité	Environnement équipé
FP09	Protéger l'espace équipé des nuisances environnementales générées par l'infrastructure	Environnement mobile	Environnement équipé
FP10	Créer une proximité entre espace actif et espace équipé	Environnement actif	Environnement équipé
FP11	Créer une proximité entre espace habité et espace actif	Environnement habité	Environnement actif

Les **fonctions de contrainte** expriment les interactions directes entre un milieu extérieur ou composant et la couverture. L'étude des interactions de chacun de quatre environnements avec la couverture a permis d'identifier **neuf fonctions de contrainte**. Le tableau 2 ci-dessous liste ces fonctions en précisant les environnements extérieurs en interaction directe avec la couverture.

Tableau 2 : Fonctions de contrainte de la couverture d'infrastructure urbaine (Marina Fund-Maurin)

FC	Intitulé de la fonction	Environnement en interaction directe avec la couverture
FC01	Assurer le confort des populations sur l'espace mobile	Environnement mobile
FC02	Créer du foncier à destination de l'espace mobile / Créer de l'espace mobile	Environnement mobile
FC03	Assurer l'efficacité de l'infrastructure de transport	Environnement mobile
FC04	Créer du foncier à destination de l'espace équipé / Créer de l'espace équipé	Environnement équipé
FC05	Assurer le confort des populations sur l'espace équipé	Environnement équipé
FC06	Assurer le confort des populations sur l'espace actif	Environnement actif
FC07	Créer du foncier à destination de l'espace actif / Créer de l'espace actif	Environnement actif
FC08	Créer du foncier à destination de l'espace habité / Créer de l'espace habité	Environnement habité
FC09	Assurer le confort des populations sur l'espace habité	Environnement habité

Les résultats de cette analyse fonctionnelle, ainsi que la base de données établie dans le cadre de la tâche 1, ont constitué les principales données d'entrée de la tâche 5 décrite ci-après.

2.5. Réponses du génie civil urbain aux fonctions et contraintes des couvertures

La tâche 5 s'est donné comme objectif de décrire et d'analyser les réponses que peut apporter le génie civil aux enjeux de tous ordres des projets de couverture, enjeux décrits et analysés par les travaux des tâches précédentes. Ces travaux ont été divisés en :

- typologie, analyse et évaluation des structures lourdes,
- typologie, analyse et évaluation des structures légères,
- interface dessus-dessous – aspects règlementaires et contraintes techniques,
- modules d'aménagements environnementaux et « focus » sur la végétalisation,

- synthèse faisant l'inventaire des réponses aux fonctions attendues.

Les travaux de la tâche 5 comportent aussi un retour d'expérience sur les couvertures réalisées dans le cadre de la ZAC Paris Rive Gauche, déjà mentionné dans le chapitre relatif à l'état de l'art.

2.5.1. Typologie, analyse et évaluation des structures lourdes.

Une couverture lourde est définie comme une structure apte à supporter des voiries urbaines, des aménagements paysagers et/ou des immeubles tout en respectant toutes les fonctionnalités de l'infrastructure couverte. Pour l'analyse nous avons retenu quatre types de couvertures :

- Les **structures voûtées**, associant des ouvrages en béton ou en maçonnerie à des remblais de couverture qui restituent la continuité du sol « végétal ».

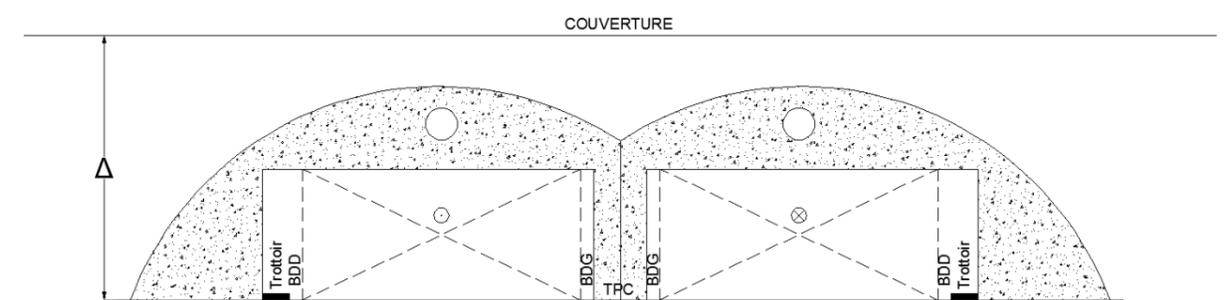


Figure 6 – Schéma de principe d'une structure voûtée.

- Les **dalles simples**, au sens large, qu'il s'agisse de dalles pleines en béton armé ou précontraint, ou de structures à poutres en béton, métalliques ou mixtes ;

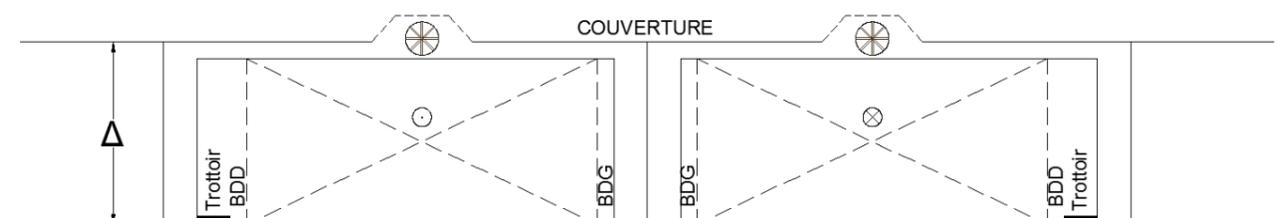


Figure 7 – Schéma d'une dalle simple.

- Les **dalles doubles**, comportant deux niveaux séparés par un espace utilisable (parkings, circulations, réseaux), les deux niveaux étant structurellement reliés entre eux pour bénéficier de la grande capacité portante qui en résulte ;

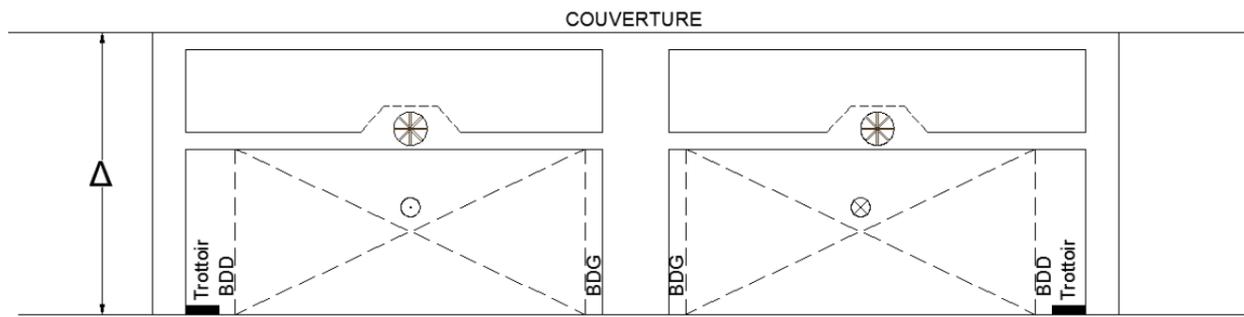


Figure 8 – Schéma d'une dalle double.

- Les **dalles ajourées**, variante des dalles simples, où la présence d'ouvertures permet de répondre à certaines fonctions, comme la transparence aéraulique.

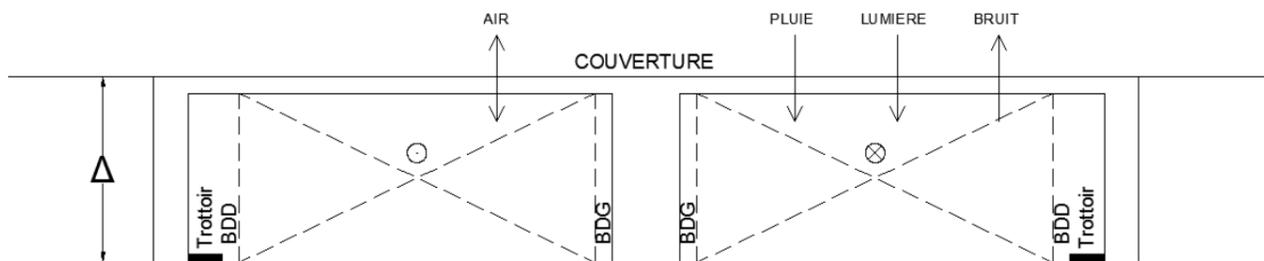


Figure 9 : Schéma d'une dalle ajourée en coupe

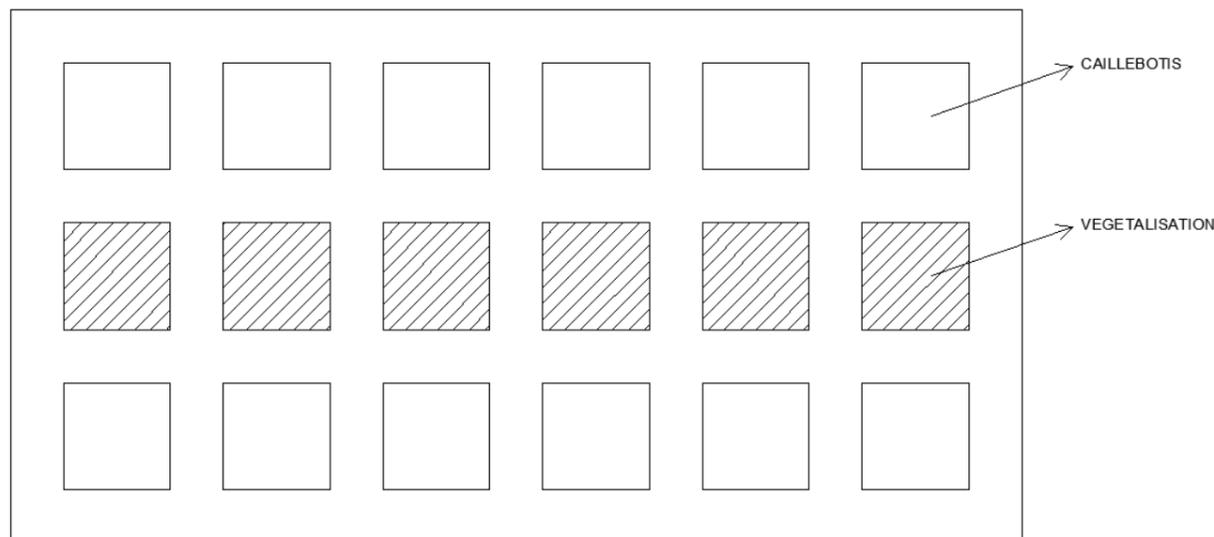


Figure 10 – Schéma d'une dalle ajourée, vue en plan. Les vides sont autant de modules dont la fonction peut évoluer au cours de la vie de l'ouvrage.

Chaque type de structure a fait l'objet d'une étude préliminaire en considérant deux projet-types : couverture d'une infrastructure routière comprenant 2 voies dans une direction et 3 voies dans l'autre, et couverture d'une infrastructure ferroviaire comprenant 2 voies dans une direction et 2 voies dans l'autre. De plus, pour les voiries routières, on a distingué les couvertures de moins de 300 m de longueur

de celles d'une longueur supérieure pour tenir compte de l'impact de la réglementation sur les tunnels routiers. A partir des résultats de ces études préliminaires, des évaluations comparatives des solutions ont été établies, en premier lieu sur des critères de coût, et ensuite sur des critères liés aux fonctions attendues.

Comparaison sur la base du coût : Nous donnons (Figure 11 page suivante) les résultats de ces comparaisons en fonction du type de voie franchie, puis en fonction du type de structure, en attirant l'attention du lecteur sur le fait que les montants indiqués sont théoriques et n'ont de sens que pour la comparaison des solutions.

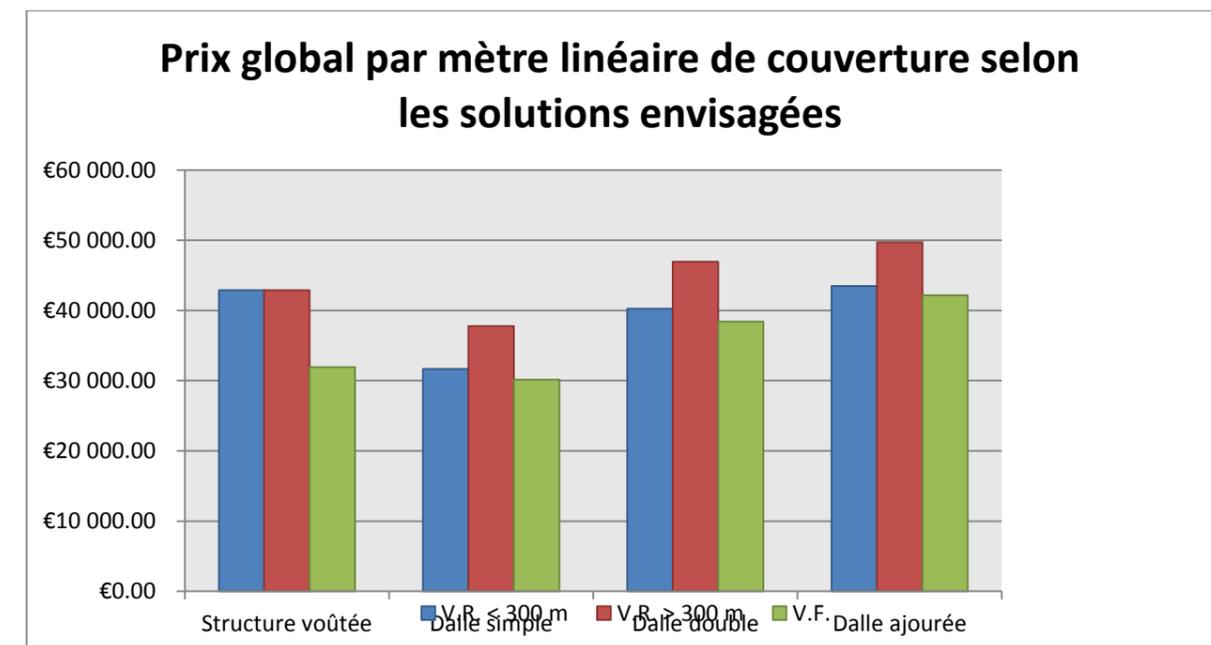
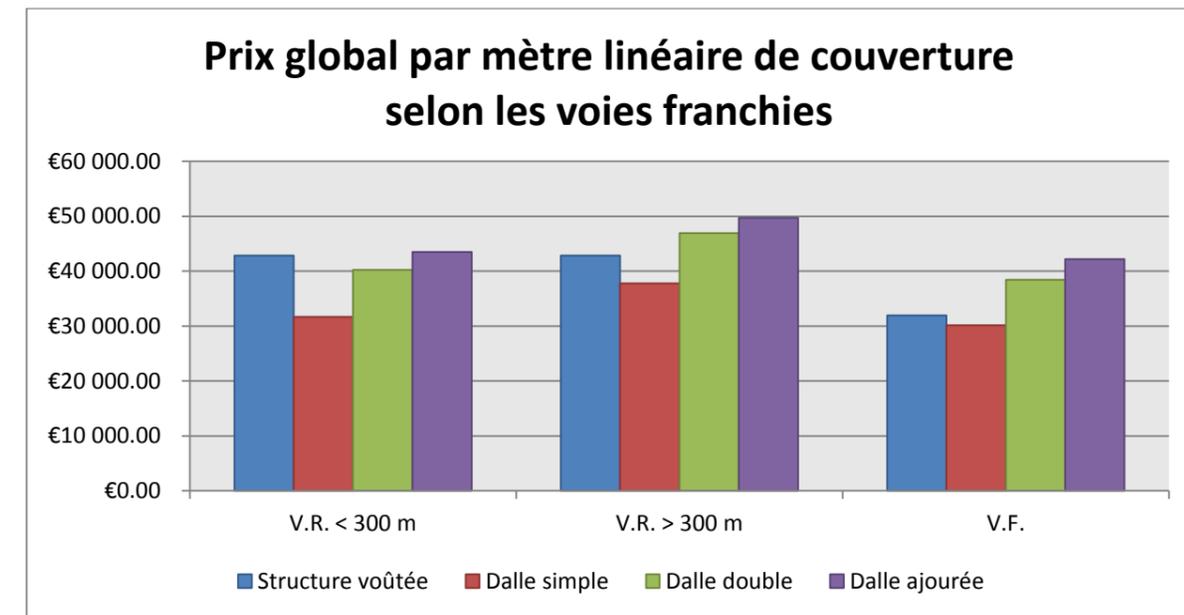


Figure 11 – Graphiques comparatifs du prix par mètre linéaire de couverture.

Cette analyse comparative permet de mettre en évidence que le coût des différentes couvertures lourdes varie relativement peu d'une solution à une autre. Aucune solution structurelle ne se différencie significativement des autres. Cela montre que le choix d'un type de structure doit être fait avant tout en fonction des contraintes du site, notamment de la topographie, et des fonctions que l'on souhaite privilégier. Nous allons voir en effet dans ce qui suit que les différentes structures considérées répondent différemment aux fonctions attendues.

Les couvertures sont considérées comme une modification du système urbain, on attend donc de ces ouvrages de répondre à des fonctions. Ces fonctions ont été déjà définies et regroupées selon trois catégories différentes à la suite des travaux de la tâche 4 :

- **Fonctions externes :** celles liées aux objectifs primaires de la création de couvertures,
- **Fonctions internes :** celles en relation avec l'aménagement du dessus et du dessous et qui permettent l'exploitation et l'utilisation de la couverture elle-même,
- **Fonctions spécifiques relatives à la construction et à la déconstruction de la couverture :** celles relatives à la faisabilité de la couverture.

L'analyse des typologies structurelles vis-à-vis de la matrice des fonctions a permis d'établir les conclusions suivantes :

- La structure voûte apporte la meilleure réponse lorsque l'objectif principal du client est la réduction des nuisances aux riverains de l'infrastructure ainsi que l'aménagement paysager. Le remblai, indissociable de la voûte, restitue la continuité du sol et constitue le support idéal pour la création d'un environnement naturel permettant à la fois la réduction de l'impact négatif de l'infrastructure, l'essor de la biodiversité et le développement de zones d'agrément pour les riverains.
- La dalle ajourée présente de nombreux avantages, notamment de permettre une ventilation naturelle, et représente surtout, grâce à la flexibilité d'utilisation des ouvertures, la réponse la plus adaptée aux évolutions des fonctionnalités, ce qui est un facteur de durabilité.
- La dalle double, lorsque la topographie du site le permet, apporte une réponse très adaptée à la gestion des réseaux et à l'installation de parkings, ce qui est particulièrement utile lorsque des immeubles sont implantés au-dessus de la dalle, voire portés par cette dalle.

2.5.2. Typologie, analyse et évaluation des couvertures légères

Créer des couvertures sur des infrastructures routières ou ferroviaires en milieu urbain implique souvent un franchissement de portées significatives sur de grandes surfaces. Pour ce type de projet, il est aussi souhaitable de minimiser le nombre et la taille des appuis pouvant venir perturber la circulation existante. Ces aspects peuvent orienter vers des solutions de couverture à structure légère qui maximisent les portées tout en réduisant la quantité de matière.

À l'inverse d'une structure lourde de type béton, la structure légère offre des opportunités de natures différentes :

- **Montage (construction déconstruction) :** une structure légère dispose d'assemblages réguliers, qui facilitent les opérations de montage et démontage ;
- **Interruption de trafic :** un large partie du levage et de la mise en place des structures légères proposées (type gridshell ou nexorade) demande une interruption de trafic minimale et peuvent être montées en grande partie depuis les abords de l'infrastructure. Ceci contribue à réduire la gêne vis-à-vis des usagers ;
- **Modularité :** la préfabrication largement employée dans les structures légères facilite le déploiement en modules, qui peuvent prendre place sur le projet successivement dans le temps. Ces structures permettent l'intégration de modules comprenant des dispositifs environnementaux, dont les fonctions pourraient varier pour répondre à des besoins et des problématiques spécifiques (ces notions sont développées plus loin dans le paragraphe « Modules environnementaux et végétalisation »). De plus, la légèreté de ces couvertures, la variété des matériaux et des éléments qui peuvent être utilisés, offrent de nombreuses possibilités : l'aspect de surface et les fonctionnalités (notamment les fonctionnalités environnementales) qui peuvent leur être associées sont vastes. Ces caractéristiques permettent aussi un travail sur les ambiances intérieures, en y apportant de la lumière naturelle par exemple. Un confort d'usage extérieur et intérieur peut ainsi être apporté ;
- **Bilan carbone :** le bilan carbone ou l'ACV de structures légères, souvent en matériaux recyclables, est plus favorable que celui de structures lourdes.

Ces opportunités sont néanmoins le corollaire de la légèreté de la structure, qui ne peut reprendre que des charges de faible intensité. Contrairement aux structures lourdes, les couvertures légères ne sont pas accessibles à la circulation (piétonne ou automobile), et ne peuvent pas servir de support à des bâtiments ; elles ne sont donc pas capables de répondre à l'ensemble des fonctions identifiées dans le cadre de la tâche 4, mais **essentiellement aux fonctions de protection des nuisances environnementales et de confort.**

Plusieurs types de structures légères ont été identifiés et étudiés :

- **Voûtes bidimensionnelles :**



Figure 12 : voûtes bidimensionnelles

- Voûtes tridimensionnelles en coques : les ouvrages réalisés selon ce principe sont de bons compromis entre la quantité de matériaux utilisée et la surface couverte.



Figure 13 : voûte tridimensionnelle

- Gridshell : ce type de structure permet de réaliser d'importantes portées en utilisant relativement peu de matière et ainsi offrir de très grands espaces couverts par une structure sans appuis verticaux intérieurs (tels que des poteaux).



Figure 14 : Gridshell

- Voûtains sur Poteaux + Poutres : la structure est supportée par des poteaux et des poutres.



Figure 15 : voûtains sur poteaux et poutres

- Nappes de câbles : ces nappes de câbles sont fixées en rives à des ancrages ponctuels, à des câbles de lisières, à un anneau de compression ou une structure rigide. Elles sont généralement précontraintes par les tensions exercées grâce aux câbles de bordure.



Figure 16 : nappe de câbles

- Nexorades : les structures construites selon le principe de nexorade sont conçues à partir d'éléments longitudinaux reposant mutuellement les uns sur les autres et n'étant jamais liés que deux à deux. Ce principe permet entre autre de créer des assemblages très simples.



Figure 17 : nexorades

- Toiles tendues : le fonctionnement des structures en toiles tendues est basé sur le principe des surfaces minimales (c'est-à-dire la plus petite des surfaces qui remplit un contour donné) et de leur stabilité. Ce type de structure légère permet de couvrir de grandes surfaces avec peu de matière en minimisant le nombre d'appuis verticaux. Elle nécessite toutefois dans la plupart des cas d'importants encastremets au niveau des mâts ou structures portant les toiles.



Figure 18 : toiles tendues

2.5.3. Interface dessus-dessous, aspects techniques et réglementaires

La réglementation des tunnels routiers ou ferroviaires impose dans certaines conditions la mise en place de dispositifs particuliers concernant la sécurité des usagers en cas d'incident. Ces dispositifs peuvent avoir un impact non négligeable en surface, en particulier les ouvrages d'évacuation, les accès pour les services de secours ou encore les ouvrages de ventilation. L'ampleur de ces émergences peut cependant être limitée par un travail de conception, en concertation avec les services de secours et l'administration pour répondre à leurs besoins. La concertation avec les mairies, les syndicats et les riverains est également primordiale afin de trouver des solutions qui soient acceptées le mieux possible.

La démarche visant à réduire les impacts d'un projet de couverture sur son environnement se décompose en une succession d'étapes, ponctuées par de nombreux échanges avec des acteurs différents. Notre étude de l'interface dessus-dessous n'a pas pour objectif de créer un guide de solutions techniques, ce qui serait impossible compte-tenu de la diversité et de la complexité des sujets, mais plutôt d'explicitier la démarche permettant de mener à une conception intégrant les paramètres de l'environnement. Cette démarche peut être décomposée selon trois axes présentés ci-après. Chacun de ces axes a fait l'objet d'un ou de plusieurs développements particuliers (appelés « thèmes ») pour aborder les sujets majeurs.

Le premier axe concerne la longueur couverte, qui est un paramètre prépondérant. Pour cette raison le thème « optimisation de la longueur de couverture » a été largement développé pour ce qui concerne les couvertures d'infrastructures routières. En effet, les exigences réglementaires sont fonction de seuils : 300m, 500m, 800m, 1000m, 1500m, 3000m et 5000m. Les différentes solutions fonctionnelles envisageables, ainsi que leurs avantages et inconvénients, sont présentées dans le tableau 3 ci-après, pour les infrastructures routières.

Tableau 3 : avantages et inconvénients des types de couvertures d'infrastructures routières en fonction des longueurs couvertes

Solutions	Aménagements particuliers	Avantages	Inconvénients
1. Succession de plusieurs tranchées couvertes courtes (<300m) sans système de ventilation	<ul style="list-style-type: none"> 1 Issue de secours vers la surface par tube et ouvrage 1 niche de sécurité et 1 niche d'incendie par tube et par ouvrage 	Coûts de construction et d'exploitation faibles	Tranchée ouverte >100m entre les TC (impact visuel, bruit et pollution)
2. Tranchée couverte moyenne (entre 300 et 500m) avec ventilation longitudinale	<ul style="list-style-type: none"> 2 Issues de secours vers la surface par tube 3 niches de sécurité et 2 à 3 niches d'incendie par tube Bossages supérieurs ou latéraux pour positionnement des accélérateurs Murs d'anti-recyclage de fumés à chaque tête 	Coûts de construction et d'exploitation limités	<ul style="list-style-type: none"> Interdiction de congestion dans le tunnel Interdiction des TMD Sécurité limitée en cas d'incendie dans le tunnel Longueur de la TC limitée à 500m
3. Tranchée couverte longue (>500m) avec ventilation transversale	<ul style="list-style-type: none"> Issues de secours tous les 200 m Niches de sécurité et d'incendie tous les 200m Bossages supérieurs ou latéraux pour positionnement des accélérateurs Murs d'anti-recyclage de fumées à chaque tête 	Impact minimal pour les aménagements en surface	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de construction et d'exploitation plus élevés Problématique de sécurité si permission des TMD en période de congestion

Il faut cependant garder à l'esprit que les dispositions exigées par la réglementation ne sont pas forcément binaires, et sont soumises à l'accord de l'administration. La sécurité des ouvrages est alors étudiée dans sa globalité, et des dispositifs non clairement exigés réglementairement peuvent être exigés afin d'obtenir l'autorisation d'exploiter.

Le deuxième axe concerne l'insertion dans leur environnement les ouvrages techniques liés à l'ouvrage souterrain ayant un impact en surface (émergence). Le thème « intégration des émergences créées par la couverture » traite notamment de l'insertion des locaux techniques, des ouvrages de ventilation, et des ouvrages d'évacuation des usagers. A titre d'exemple, deux intégrations d'émergences particulièrement réussies : la cheminée de ventilation du Tunnel de la Croix Rousse à Lyon et une issue de secours sur les quais de la Seine à Paris. Voir figures 19 et 20 page suivante.



Figure 19 : cheminée de ventilation du Tunnel sous la Croix-Rousse à Lyon



Figure 20 : issue de secours sur les quais de la Seine à Paris

Pour accompagner ce thème, il nous a semblé important de développer le sujet lié à la maîtrise des polluants. Un ouvrage souterrain ne génère pas plus de pollution qu'une autre voie routière : cependant, le tunnel a une influence sur les concentrations en polluant puisque les polluants sont rejetés en un ou plusieurs points localisés. En effet, la solution de ventilation d'un ouvrage souterrain doit intégrer un nombre important de paramètres (conditions de trafic, conditions météorologiques locales, densité urbaine, points de rejets ...). Plusieurs techniques de traitement de l'air, telles la filtration des particules, la dénitrification ou encore la bio-filtration ont été étudiées, afin d'en comprendre les avantages et inconvénients et les applications possibles.

Le troisième axe concerne la gestion de la phase de travaux. Le thème « partage de l'espace trafic en phase chantier » fait état des solutions permettant de réaliser des travaux sur des ouvrages en exploitation (routiers ou ferroviaires), tout en assurant la sécurité des personnes (usagers et travailleurs), le maintien des conditions nécessaires à l'exploitation, ainsi que l'acceptabilité sociale (maintien de

capacités de transport suffisantes, préservation du cadre de vie). Trois solutions peuvent être mises en œuvre, en fonction du besoin, des contraintes et de la localisation de l'ouvrage :

- Neutralisation permanente de voies de circulation ;
- Fermeture totale de l'axe ;
- Ripage de balisage amovible.

L'étude de trafic est un élément déterminant pour retenir la ou les méthodes de travaux adéquates, suivant le projet à réaliser. Une concertation avec tous les acteurs locaux est donc indispensable pour le bon déroulement du projet. Le tableau ci-dessous recense les conclusions de cette partie, en évaluant les différentes solutions selon trois critères fondamentaux : sécurité des travailleurs, gêne à l'utilisateur et coût.

Tableau 4 : comparatif des solutions de gestion du trafic pendant les travaux.

	Sécurité des travailleurs et des usagers	Gêne à l'utilisateur	Coût
Neutralisation permanente de voies	Bonne	Congestion du trafic aux heures de pointe	Peu onéreux
Fermeture totale	Optimale	Longue déviation	onéreux
Ripage de balisage	Acceptable	minimisée	Très onéreux

Enfin, une étude complémentaire a été développée autour du thème de « la perception des ouvrages souterrains ». En effet, les usages des milieux souterrains se développent et ce développement nécessite de mener des réflexions relatives à la perception de ces ouvrages par leurs usagers. Un ouvrage acceptant des piétons devra par exemple disposer d'un éclairage adapté. Finalement, ce thème a pour objectif d'identifier les paramètres auxquels porter une attention particulière pour rendre des espaces souterrains adaptés à leurs usagers, afin de concilier besoins, contraintes de conception et de réalisation, et confort des usagers (acoustique, géométrie, architecture, etc.). Une étude de cas du tunnel de la Croix Rouse à Lyon a permis d'illustrer cette démarche.

2.5.4. Modules environnementaux et végétalisation

Qu'il s'agisse d'une structure lourde ou d'une structure légère, celle-ci peut être le support d'équipements permettant d'agir sur l'environnement, afin de réduire ou de compenser son impact.

Des solutions nouvelles ou innovantes de type alternatives, bioclimatiques et passives sont présentées :

- Solutions passives : Assurer des fonctions/performances (confort, gestion des nuisances, ...) sans apport d'énergie.
- Solutions bioclimatique : interagissant avec le contexte naturel local (climat, vent, ensoleillement, topographie,...)
- Solutions alternatives : mise en œuvre d'énergies renouvelables.

Les solutions environnementales sont envisagées sous la forme de modules rapportés localement, adaptables aux différentes configurations des sites, et démontables ou interchangeables au cours de la vie de l'ouvrage. Elles profitent des échanges entre le dessus et le dessous pour :

- Traiter à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur la question de la nuisance et du confort urbain ;
- Produire/mettre à disposition des ressources renouvelables pour couvrir les besoins locaux.

Afin de réaliser ces fonctions, des micromodules peuvent être installés. Ce sont des éléments standards, démontables, qui peuvent assurer plusieurs fonctions :

- Module acoustique : panneau acoustique absorbant/isolant ;
- Module énergétique photovoltaïque : production d'électricité photovoltaïque pour des usages/besoins locaux
- Module énergétique « Savonius » : production d'électricité éolienne pour des usages/besoins d'appoints locaux ;
- Module lumineux : éclairage de base ou de renfort, signalétique ou animation (LED, etc.) autoalimentées ;
- Module collecteur : collecte d'eau de pluie et stockage déporté pour usages locaux ;
- Module rétention : rétention d'eau de pluie par végétalisation permettant de compenser l'imperméabilisation des voies de circulation ;
- Module Filtrant : panneau végétalisé filtrant l'air du tunnel ;
- Module Habitat Bio : habitat écologique (niches à insecte) ;
- Module à membrane : étanchéité entre le dessus et le dessous, effet trombe (tirage thermique).

Le choix de ces modules dépend du contexte de l'opération : configuration du site, climat, sensibilité de l'espace urbain local.

La **végétalisation** peut répondre à plusieurs fonctions :

- Fonction économique alternative : création de ressources pour l'agriculture urbaine ;

- Valorisation esthétique du quartier : occulter les axes de transport, déminéraliser les espaces urbains, etc. ;
- Fonction d’ambiance : fleurissement, site d’accueil pour les œuvres d’art ;
- Fonctions bioclimatiques : contribuer à la baisse de la température urbaine, favoriser la biodiversité animale, limiter l’impermeabilisation des sols, etc. ;
- Fonctions dépolluantes : de l’air, des sols, des eaux ;
- Diminution de la pollution sonore et visuelle ;
- Fonction bio-protectrices : permettre le développement de la biodiversité animale.

Il est donc possible d’utiliser la couverture comme support d’une démarche écologique.

2.5.5. Synthèse : inventaire des réponses aux fonctions attendues

La tâche 5 a permis d’inventorier et d’analyser des solutions pour une approche globale et cohérente de la conception et de la construction de couvertures, respectueuse des critères du développement durable, en apportant des réponses techniques aux fonctions définies précédemment.

Elle a permis aussi de mettre au point un outil d’analyse et d’évaluation des projets de couverture, sous la forme d’une matrice indiquant la capacité d’une solution technique à répondre à un ensemble de fonctions, tout en permettant de pondérer les critères d’évaluation : fonctionnalité, protection environnementale et intégration urbaine notamment.

2.6. Conclusion

Le projet CANOPEE a exploré l’identité et la complexité des projets de couvertures d’infrastructures de transport en milieu urbain, en leur apportant un éclairage pluri-disciplinaire. L’hypothèse selon laquelle ils constituent un type particulier d’ouvrages de génie civil a été pleinement vérifiée. Le rapport final et la synthèse des travaux constitueront une somme d’informations, à la fois retours d’expériences et pistes d’amélioration et d’innovation, qui seront ainsi mises à la disposition de tous ceux qui s’engagent dans de tels projets, à différents niveaux de responsabilité et à différentes étapes.

3. ACTIONS DE VALORISATION

3.1. Séminaires

Deux séminaires ont été organisés dans le cadre de ce projet :

Un séminaire de mi-parcours, le 5 novembre 2013, dont le document d'invitation est reproduit ci-dessous :

<p style="text-align: center;">CANOPEE</p> <p style="text-align: center;"><i>Méthodes et outils pour optimiser la programmation, la conception, la réalisation et l'exploitation de couvertures d'infrastructures de transport en milieu urbain</i></p> <p style="text-align: center;">Séminaire de mi-parcours le 5 novembre 2013 à 9h FNTF, 3 rue de Berri, Paris 8ème</p>	<p>Projet subventionnée par</p> <p style="text-align: center;">AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR</p> <p>Lauréat de l'appel à projets « Bâtiments et Ville Durable » 2011</p>
<p>A mi-parcours du projet de recherche CANOPEE, nous organisons un séminaire afin de présenter l'avancement de nos travaux et de recueillir les avis et commentaires d'experts et d'opérationnels dans les domaines concernés.</p> <p>A ce titre nous avons le plaisir de vous inviter personnellement à vous joindre à nous pour cette journée de présentations et d'échanges.</p>	
<p>Le projet CANOPEE a pour objet le développement de méthodes et d'outils pour optimiser la programmation, la conception, la réalisation et l'exploitation de couvertures d'infrastructures de transport en milieu urbain.</p>	<p>Partenaires du projet</p> 
<p>Partant du constat que ce type d'ouvrage, malgré son importance dans le cadre de l'intégration des infrastructures de transport dans la ville, n'a pas fait l'objet de travaux de recherche, ni de recommandations spécifiques, nous avons établi un programme pluridisciplinaire comprenant 5 tâches :</p> <ul style="list-style-type: none"> Tâche 1 : Recherche et compilation des études et projets antérieurs – Analyse et synthèse de la documentation réunie Tâche 2 : Analyse et évaluation des enjeux et montages juridiques pour ces opérations Tâche 3 : Analyse organisationnelle du pilotage des projets Tâche 4 : Mise au point d'outils de diagnostic et d'évaluation Tâche 5 : Approche globale et innovante de la conception technique et de la réalisation des couvertures <p>Afin d'avoir un dialogue et des échanges aussi riches que possible, le programme de cette journée alterne sessions de présentation de nos travaux et tables rondes : une première session, le matin, portera sur les tâches 1 à 3, et une seconde, l'après-midi, sur les tâches 4 et 5. Chacune sera suivie d'une table ronde. Nous avons aussi prévu, entre les deux sessions, afin d'alimenter le débat, de donner la parole à deux urbanistes reconnus qui ont été amenés par leur pratique à réfléchir sur ces sujets : Bert van Eekelen, qui nous parlera de son travail sur le programme Zuidas à Amsterdam, et Christian Devillers, qui présentera l'approche projet à travers des études récentes d'ouvrages de ce type.</p>	

<p style="text-align: center;">CANOPEE</p> <p style="text-align: center;"><i>Méthodes et outils pour optimiser la programmation, la conception, la réalisation et l'exploitation de couvertures d'infrastructures de transport en milieu urbain</i></p> <p style="text-align: center;">Séminaire de mi-parcours le 5 novembre 2013 à 9h FNTF, 3 rue de Berri, Paris 8ème</p>	<p>Projet subventionnée par</p> <p style="text-align: center;">AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR</p> <p>Lauréat de l'appel à projets « Bâtiments et Ville Durable » 2011</p>
PROGRAMME PREVISIONNEL	
9h00 – 9h15 / Accueil des participants	
9h15 – 9h30 : Présentation du projet CANOPEE	
9h30 – 11h15 / Session 1 – Panorama et questionnements	
9h30-10h10 : Base de données, description typologique, variété de situations	
10h10-10h35 : Questionnements juridiques à partir d'un cas particulier	
10h35-11h15 : Spécificités en termes de jeux d'acteurs : éléments de complexité	
11h30 – 12h30 / Table ronde : Exploitation des couvertures	
14h00 – 15h10 / La parole aux invités	
Présentation des intervenants	
14h00 – 14h25 : Le cas de Amsterdam Zuidas	Bert van Eekelen (Arcadis)
14h25 – 14h50 : Réflexions sur des projets récents : la démarche projet	Christian Devillers
14h50 – 15h10 : Discussion avec la salle	
15h15 – 16h30 / Session 2 – Quelle(s) couverture(s) pour demain ?	
15h15 – 15h50 : Evaluer les couvertures : un outil pour qui ? pour quoi ? à quelle échelle ?	
15h50 – 16h30 : Pistes d'innovation technique	
16h45 – 17h45 / Table ronde : Programmation des couvertures	

Un séminaire de restitution, les 28 et 29 septembre 2015, dont le programme est reproduit ci-dessous :

PROJET DE RECHERCHE CANOPEE <i>Méthodes et outils pour optimiser la programmation, la conception, la réalisation et l'exploitation de couvertures d'infrastructures de transport en milieu urbain</i> SEMINAIRE DE CLOTURE & PRESENTATION DU PROJET PARIS RIVE GAUCHE 28 et 29 septembre 2015 - FNTF - 3 rue de Berri, Paris 8	
 Lauréat de l'appel à projets « Bâtiments et Ville Durable » 2011	
PROGRAMME	
Lundi 28 septembre 2015	
9h00 – 9h30 : accueil - café	
9h30 - 9h45 : Mot d'accueil	Didier Bailly, directeur de la Voirie et des déplacements (Ville de Paris)
9h45 –10h00 : Introduction du séminaire	Michel Moussard (ARCADIS)
10h00 – 11h10 : Session 1	
10h00-10h30 : Ville et autoroute : vers une réconciliation ?	Jacques Jo Brac de la Perrière (Ville et Transport en Ile de France)
10h30-11h00 : Les métamorphoses de l'autoroute urbaine	Paul Lecroart (IAU-IdF)
11h00-11h10 : Questions-réponses	
11h10 – 11h30 : Pause	
11h30 – 12h30 : Session 2	
11h30 -11h55 : Typologie des opérations d'urbanisme avec couverture.	Laurent Ducourtieux (EIVP)
11h55 – 12h20 : Modélisation et évaluation de couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires en milieu urbain.	Katia Laffréchine (Université de Paris-Est Marne-la-Vallée)
12h20– 12h30 : Questions/réponses	
12h30 – 13h45 : déjeuner	
13h45 – 15h40 : Session 3	
13h45-14h05 : Contexte juridique	Rozen Noguellou (Université de Paris)
14h05-14h30 : Couvertures d'infrastructures et projets urbains : de l'interdépendance dans le pilotage des projets à la coordination de l'action collective.	Joël Idt Stéphanie Leheis (Université de Paris-Est Marne-la-Vallée)
14h30-14h55 : "Back stage and dressing room, in search for governance"	Bert Van Eekelen
14h55 – 15h30 : Les réponses du génie civil aux enjeux des couvertures, de la conception à l'exploitation	Pierre Mérand (Egis) François Appéré (ARCADIS) Benjamin Touraine (Egis)
15h30 - 15h40 : Questions/réponses	

15h40 – 16h pause	
16h00 – 17h30 / Session 4	
16h00 – 16h20 : Pistes d'innovations techniques	Erwan Breton (TECOMAH) Laurent Jacquet (Egis)
16h20-16h40 : Le Projet Ville 10D – Complémentarités avec Canopée	Laetitia d'Aloia Shwartzentruber (CETU)
16h40 – 17h15 : Table ronde : conclusions et perspectives	
17h15-17h30 : Synthèse de la journée	Michel Moussard (ARCADIS)

Mardi 29 septembre 2015	
9h00 – 9h30 : Accueil – café	
9h30 – 10h40 : Session 5	
9h30 – 10h00 : Le projet « Zuidas » à Amsterdam (en anglais)	Bert van Eekelen
10h00 – 10h30 : Paris Rive Gauche – présentation générale	Jean-François Gueullette (SEMAPA)
10h30 – 10h40 : Questions – réponses	
10h40 – 11h00 Pause	
11h00 – 12h30 : Session 6	
11h00 – 11h30 : Paris Rive Gauche – programmation et urbanisme	Ludovic Vion (SEMAPA)
11h30 – 12h00 : Paris Rive Gauche – Génie civil urbain	Jean-Louis Gerbenne (SEMAPA)
12h00-12h15 : Paris Rive Gauche – retour d'expérience sur projets de couverture	Pierre Focqué (Egis)
12h15 – 12h30 : Questions-réponses / conclusion du séminaire	
12h30 – 13h30 : déjeuner	
Après midi : de 14h30 à 16h30 : visite guidée du site de Paris Rive Gauche (sur inscription – rendez-vous au centre d'information de la SEMAPA en face de la BNF)	

3.2. Communications et publications

- Communication au colloque APERAU (Association pour la Promotion de l'Enseignement et de la Recherche en Aménagement et Urbanisme) 2013 à Aix en Provence : Les espaces délaissés de la métropole, regards sur l'insertion urbaine des infrastructures de transport (auteurs : Brice Chandon – Laurent Ducourtieux – EIVP)
- Communication et publication dans le cadre des rencontres de l'AUGC les 5 et 6 juin 2014 à Orléans : présentation et article par Fund-Maurin Marina, Laffrêchine Katia, Allaire Didier, Morand Denis : Principes de modélisation des couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires en milieu urbain, 10 p., 2014
- Communication pour GC 2015 (journées biennales de l'AFGC) : article présenté par Michel Moussard et François Appéré et Pierre Mérand le 18 Mars 2015 (auteurs : Moussard – Appéré – Mérand).
- Communication à la « 3rd Annual Conference on Architecture and Civil Engineering » (ACE 2015), Singapour, Avril 2015, par Marina Fund-Maurin (auteurs : Fund-Maurin, Laffrêchine, Morand et Allaire) : « Principles for modeling structural covers over road and rail infrastructures in urban areas » .
- Communication dans le cadre du Concours Jeunes Chercheurs, Prix René Houpert, AUGC, Bayonne 2015 (Marina Fund-Maurin, Modélisation et évaluation de couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires en milieu urbain)
 - Communication au Congrès ITA-WTC de mai 2015 à Dubrovnik : "CANOPEE: programming, designing and construction of urban covers" (auteurs : P.Mérand – F. Appéré – B. Touraine)
 - Communication au Congrès annuel de l'AESOP, Prague, 15 juillet 2015 : "Dealing with a complex urban object: planning the covers of transport infrastructures in urban areas" (auteurs : Joel Idt et Stéphanie Leheis)
- Communication au Symposium IABSE Genève (Sept 2015) par François Appéré (auteurs : Moussard – Appéré -Mérand).
- Publication dans les Annales du BTP de Novembre 2015 : Le Projet de recherche Canopée sur la programmation, la conception et la réalisation de couvertures d'infrastructures de transport en milieu urbain (auteurs : Moussard – Appéré – Mérand).