



LE PROJET DE RECHERCHE CANOPEE SUR LA PROGRAMMATION, LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE COUVERTURES D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN MILIEU URBAIN

CANOPEE RESEARCH PROJECT - METHODS AND TOOLS TO OPTIMIZE PLANNING, DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATION OF STRUCTURAL COVERS OVER TRANSPORTATION INFRASTRUCTURES IN URBAN AREAS

Michel MOUSSARD*, Pierre MÉRAND, François APPÉRÉ*****

* ARCADIS

** EGIS

***ARCADIS



1. INTRODUCTION

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, réalisées 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.

1. INTRODUCTION

Road and railway infrastructures in urban contexts generate visual, acoustic and atmospheric pollution, as well as deep disconnection within urban structures. To compensate for this currently existing problem, different approaches have been developed: when these infrastructures are located at the road and railway levels, one approach has been to carry out urban boulevards transformations along with landscaping works as well as sometimes the establishment of a TCSP (Boulevard des Maréchaux in Paris, ex-peripheric boulevard in Lyon); when they are in trenches, projects have involved the construction of a structural cover to ensure both protection against interferences and urban continuity (Boulevard périphérique in Paris). Our work follows this second approach.

In addition to their capacity of reducing interferences, these structural covers also represent an opportunity within the framework of urban planning strategies, to occupy grounds, for land and housing policies, as well as for the development of transport and economic activities. The construction of infrastructural covers also implies the creation of artificial flooring, then available for public and private uses. This type of work can also allow for the construction of buildings, which multiplies the function and operation possibilities of these different constructed buildings. Taking into account the experiences of the 1960s and 1970s “quartiers sur dalle” or of more recent covering operations can allow for a better preparation against management and maintenance difficulties.

These structural covering works represent complex urban civil engineering projects, carried out in difficult conditions when the concerned sites are congested and need to see their traffic running during the construction phases. Despite the fact of representing a very specific type of work, structural covers over transport infrastructures in urban areas have never been the subject of particular regulations or recommendations: they are neither bridges nor tunnels, buildings, roadways and railways, but all of these at once, and particularly if we take into account their capacity to support buildings, roadways, railways or landscape planning projects. This has led to their separation into different parts (infrastructures, equipments, surface planning, buildings), treating them independently from one another, whilst applying different regulations more or less coherent with one other, and managing as best as possible their technical and legal interconnections. However, the interactions are strong and most of all, the project management process is fundamental.

This absence of a global vision, systematic approach as well as planning and designing tools restrains without any doubt the optimal use of these structures for urban renewal. This is despite the fact that they hold a huge potential when looking at the size of the surfaces occupied by big transport infrastructures in large cities.

It is symptomatic to see that there exists neither an official name nor a specific acronym for this type of work; we will call them “structural covers” in the following pro-

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 par l'Université Paris-Est, établissement de Créteil, puis transféré à l'Université Paris 1 (tâche 2).
 - 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 piloté par l'Université Paris-Est, établissement de Marne-la-Vallée (tâche 3).
 - 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 piloté par l'Université Paris-Est, établissement de Marne-la-Vallée (tâche 4).
 - 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 par Egis, en collaboration avec ARCADIS et Tecomah (tâche 5).
- Le pilotage global du projet et la synthèse sont réalisés par ARCADIS (tâche 6).

Les autres membres du groupement, qui apportent leur concours et leur expertise, mais ne sont pas directement impliqués dans les travaux de recherche, sont la Ville de Paris et l'IREX. Le CETU intervient aussi 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 se terminera fin Octobre 2015, avec en particulier la remise du rapport final.

2. ÉTAT 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'École pour établir une base de données qui détaillera 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).

ject proposal. It is necessary to clarify that despite the similarities, we are not looking here at “urbanisme de dalle”, even if our project's subject is related to cities' vertical dimension.

Given this lack of studies and documentation on this type of work, the Canopy project has adopted the following goals:

- establish initially a state of the art of these works, and group within a database an extensive documentation on the remarkable achievements in France, Europe and the World: the work was done as part of Task 1, piloted by EIVP.
- consider the legal aspects of the development of these projects, especially in terms of ownership, with the appearance of volume division: This work was carried out by Université Paris-Est - Creteil, then transferred to the University of Paris 1 (Task 2).
- Examine how the strong interactions between the infrastructure project on the one hand and the other urban project (the “bottom” and “top”) are translated at the actors' roles level. This work was led by the Université Paris-Est - Marne-la-Vallée (Task 3).
- To analyze the systemic and rational functions of this object “cover”, defined here as the civil engineering structure itself: this work has been led by the Université Paris-Est - Marne-la-Vallee (Task 4).
- Seek based on the work of the first four tasks which responses engineering and construction industry can bring to challenges which are specific to these works. This work was piloted and implemented by Egis in collaboration with ARCADIS and Tecomah (Task 5).

The overall management of the project and its synthesis are carried out by ARCADIS (Task 6).

Other members of the group, who support and bring expertise, but are not directly involved in the research, are the City of Paris and IREX. CETU also acts as counsel.

This project was selected by the ANR under the Sustainable Buildings and Cities program in 2011 and launched in January 2012. It will end in October 2015, with in particular the submission of the final report.

2. STATE OF THE ART

The first task, that is to say the analytical review of covers projects in several continents, was coordinated by EIVP, under the direction of Laurent Ducourtieux. A young engineer, Brice Chandon, was employed for two years by EIVP to establish a database detailing more than a hundred such operations, realized mostly in France but also in Europe, North America and Australia (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 avions 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 déclassez 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

We did not pretend to be exhaustive. However comparison with the CETU database for tunnels in France showed that we had identified almost all covers more than 300 m long. Our objective was to compare these operations together, to see if we could distinguish categories.

After reviewing many cases very different from each other, we confirmed that large infrastructures covers bring an appropriate answer to an urban development problem with several dimensions. Three questions in particular appeared critical with regard to the decision to cover or not, that are partially independent of each other:

- There is first the question of the use of major infrastructure that crosses the site: do we want to maintain a high traffic or increase it, or do we want to downgrade the way and reduce or eliminate traffic? The answer to this question determines the choice to cover or not.*
- There was then the nature of the proposed housing development on this site. Do we have undeveloped land alongside the way? Can we develop an artificial soil? Do the net population density and the intended urban intensity target justify to limit the nuisances?*
- There is finally the topographic configuration of the site, favorable or not to a civil engineering operation. An existing trench configuration is well adapted to a cover, where the upper level will naturally meet the level of the roads and adjacent lands. Then when transportation infrastructure is at the adjacent ground level, the cover integration into the urban fabric may require major works. However, we found through the analysis of our database and the feedback from some emblematic projects such as the Paris Rive Gauche district or the operation Sijtwende in Holland, that the coverage of road and rail infrastructure located at ground level was quite possible and could lead to urban development of high quality, provided that the operation can be extended on both sides of the road covered. Recent studies conducted by the Christian Devillers urban planning agency for the cover of Paris Ring Road in the Minimes Station sector also showed the interest of such an approach, which can be much more "achievable" than lowering the level of an infrastructure carrying intensive traffic, while offering real urban development opportunities.*

The database and its analysis also confirmed – if necessary – the fundamental differences between roadways cover projects and those of railways. First vis-à-vis the opportunity to cover and possible alternatives. It appears that in the case of rail infrastructure, decommissioning is rarely feasible, especially in large cities where the access of intercity railways to city centers is a key factor in sustainable mobility. It is interesting in this context to recall that a debate had been opened in Paris on whether to move stations beyond the ring road, which ended with the maintenance of these stations intra-muros, despite the enormous potential of urban real estate represented by the areas covered by the great lines that converge in 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 sou-



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.
- 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

habitable 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. One may say that for rail infrastructure there are only two alternatives, either to remove it, which is rarely feasible nor desirable in dense urban environments, or maintain it virtually as it is, although trying to take into account projects to come. While for road infrastructure there is a wide variety of solutions, in a generally unfavorable environment for the maintenance of traffic in the city, at least at current levels of intensity and speed. These two modes also differ sharply vis-à-vis cover projects, the constraints they generate, whether operating constraints, particularly in the construction phase, or constraints related to safety in tunnels, which are fixed by different regulations. Our state of the art research also led us to take an interest in Dutch projects and research. Three projects have particularly caught our attention:

- *The insertion of Route 14 in the Hague (tunnel Sijtwende), where a public-private partnership based on sharing an expressway project and a housing program have integrated infrastructure design with its urban environment, in the context of the cover of a road located at the natural ground level.*
- *The “Utrechtse Baan” cover project over the A 12 Motorway in The Hague. This project includes five bridges-buildings distributed along the 1,2 km long highway, and partial covers in between. Because of the high value of real estate in this city center, these building were profitable despite the higher cost, and helped restore urban continuity.*



**Figure 1 : couverture de l'A12 à la Haye.
Figure 1: A12 cover – Den Hagen.**





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.

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.

- *The covering of roads and railways of the new Zuidas area south of Amsterdam, a new business district close to Schiphol International Airport, crossed by the A10 motorway and railway lines. Project doubly interesting, by its scale, and by the game of actors it generated. The initial project, which provided full coverage of roads and railways, and the construction of buildings above the covered roads, on private financing of infrastructure as part of the planned real estate transactions, had to be abandoned as a result of the “subprime” crisis. After close consultation between public and private actors, in the tradition of “Dutch dialogues”, a more modest project was selected, with coverage of roads only, under public financing, coverage of railways and of buildings above being postponed to more favorable times.*

As part of a study tour in Holland we started fruitful discussions with Bert van Eekelen, urban planner and researcher, author of a recently published book on Zuidas project. It gave us also the opportunity to read a very complete research work on the development of real estate projects over urban rail networks, whose results were published by Sebastiaan de Wilde in Rail Estate.

Finally, on the occasion of investigations for different tasks, we had many contacts with SEMAPA for Paris Rive Gauche project, which fully illustrates by its scope and variety the potential of infrastructure covers in urban areas, and became the reference project of our research work. As part of task 5, an important work of compilation of various technical solutions implemented within the covers of the railways to and from “Gare d’Austerlitz” was directed by Pierre Foqué of Egis. This work complements the work of Task 1.



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



3. 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. À 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. 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

3. LEGAL ASPECTS

Reflections on the legal aspects of cover projects, led by Prof. Rozen Noguellou, and produced by Laura Preud'homme, PhD, were conducted on the basis of surveys and analysis on four projects: Paris Rive Gauche, Olympiades District in Paris, Paris Ring Road cover at Porte des Lilas, and "ZAC des Batignolles" in Paris. Cover projects, calling for the superposition of structures and functions, raise a number of specific legal problems, particularly regarding the division of property and contractual issues.

The ownership division is essentially a volume division (concept historically introduced as part of "La Défense" business district development), between the owners of the covered road, of the cover itself and possibly of the buildings constructed above. The cover itself may be divided into areas. Two projects in particular illustrate the problems encountered, the cover of the "Olympiades" on the one hand and Paris Rive Gauche on the other. "Olympiades" cover belongs in fact to "urbanisme de dalle" more than just transportation infrastructure covering, but illustrates the potential difficulties of an approach of property division that was to give the cover property to the co-owners of the buildings. As these owners do not have the financial capacity nor the structure to deal with the maintenance of the slab, it is not maintained. This situation lead to a gradual degradation situation unresolved to this day. At the other end of the spectrum, in the case of Paris Rive Gauche project, given its size and duration, the actors were able to develop a sophisticated approach of shared ownership between RFF, infrastructure and cover supports owner, SEMAPA, owner of cover surfaces used as public space, and the buildings owners, public and private, who are also owners of the covers located right under their buildings. At the early stages of the project, ownership of certain slabs had been divided in layers between RFF for the lower layer and SEMAPA for the higher, but this provision was later abandoned.

Regarding the contractual arrangements, there are primarily those with public owners acting directly, and those with private entities acting on behalf of public owners, under delegation. In the first case it will be in the context of a public works contract, governed by the Public Procurement Code and the MOP law. This framework, well known and well controlled by public agencies, may have two disadvantages: it requires public financing of the entire operation, and it does not facilitate the integration in the project of all the technical complexities, including construction issues. Hence the use of contracts that transfer temporarily the owners right and duties to a private entity, with four options available: works concession, public-private partnership contract, administrative long lease and "concession d'aménagement", which have the advantage of deferring all or part of the financing costs to the private client, and imposing a logic of constructive and economic performance. Works concession, which assumes the remuneration of the other party (the private temporary owner) with a toll, is not suited to this type of project. Installing a toll to cross the ring road or the Avenue 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.

4. 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'interdépendances 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.

France is not realistic! The choice between the three other alternatives depends on the type of project. The public-private partnership requires special conditions of complexity or urgency. The development concession, which is required when the sale of property is part of the process, appears to be generally the best solution.

4. JEUX D'ACTEURS

In continuation to the reflections on the contractual arrangements of cover projects, the work of Task 3, performed by Joel Idt and Stephanie Leheis (East Paris University Lab'Urba, Urban Engineering department), relate to organizational analysis of the way these projects are driven. The objective is to highlight how the actors are organized, and to identify the main challenges in terms of coordination within collective action. The idea is not to define an ideal organization, giving the keys to a successful coordination between actors, and as such it is important to note at the outset that there is no “ideal” organization of a project, each project requiring a specific organization. However, this analysis aims at shedding light on the problems and difficulties of coordination, to help potential actors to identify critical issues for the implementation of such projects

When constructing a cover, several actors, each having an action to perform, with their skills and knowledge, must act together to build an object. Between the one who build the covering structure, the one who equip the surface, or the one that manages the infrastructure below, the actors involved are in a situation of interdependence where the actions of one impact the others'. This task was to question the cooperation between actors, and to identify features that they can implement to organize this cooperation. On this point, the sociology of organizations and public action provides lines of thought to highlight the way the actors react and operate in a collective action situation. The resulting analysis framework helps understanding the situations of interdependencies between actors, the strategies that actors can implement in this context, and devices built to govern these interdependences situations and organize collective action.

Each project usually being carried out by different actors belonging to different professional body, it is at the interfaces that are found the main difficulties of collective action, with players who follow each their own process, with their own timetable and constraints, do not necessarily speak the same language, but have to coordinate themselves to manage the interferences between the multiple dimensions of the cover project.

The technical characteristics of the cover (length, width, capacity, materials, etc.) have a pivotal role on games of

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'aménagements 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 com-

actors and on the modalities of coordination between actors. Strong constraints are imposed upon this object, particularly those related to the safety of the structure and to its implementation, so that the cover can be viewed as a costly and complex work of art. The technical choices made, for example on the type of coverage, are determining the amenities options on the surface. As a result actors games are modified and deeply constrained. Thus, the actors who plan the surface installations often face constraints imposed by the characteristics of the structural cover, on which it is not always possible to go back. The methods of coordination between actors are thus partly determined by the technical characteristics of the work. The analysis highlights the importance of these characteristics and leeways on which actors can play to coordinate themselves.

The enquiry methodology was based on several case studies. Three exploratory cases were first analyzed in order to test and refine the analysis grid: the completion of the bypass L2 in Marseille (a rodway infrastructure), the coverage of the A6 Motorway in the Val de Marne, and coverage of Paris Ring Road - Porte des Lilas.

These exploratory case studies allowed for example to highlight the multiplicity of logics that justify an infrastructure cover project: reduce pollution, create land, rearrange a neighborhood by removing an urban cut, rethink of transport flows in burying them (to increase speed safely, for example), etc. There is a combination of at least two strategies: one related to transport and the infrastructure below (what it brings in terms of improvement of traffic, and its inclusion into a metropolitan, not just local, transport policy), the other related to urban development (relative to the treatment of covers and their articulation with the urban space).

Following this exploratory study, a field survey and a detailed and comparative analysis of five case-covers was conducted: the covering of existing railways at the exit from Austerlitz Station in ZAC Paris Rive Gauche, the widening of part of the railway network around Brussels accompanied by localized covers, covering of an urban expressway accompanied by construction of a surface tramway in Karlsruhe, burying the A55 in Marseille within the Euro-Mediterranean project, a cut and cover expressway section in Gennevilliers. Project selection meets a requirement to work on several types of cover, for which the interaction between civil works and urban environment are particularly high.

Field enquiries resulted first in a work on bibliographic, technical, topographical data, on selected projects, so as to identify the main features of these projects and the actors involved. Then interviews were conducted with project stakeholders. The panel includes actors from the owners teams and from the project management teams, stakeholders involved with the infrastructure below, the cover or surface facilities. Two levels of analysis were identified: the level of institutions and groups of actors (with their standards and technical universe), and the level of individuals (to identify actors systems within an institution). In total, approximately ten interviews for each case study, ie a total of fifty interviews, were conducted.

prend 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 (niveaulement, cheminement,...) 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.

5. 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

Finally, the analysis was structured around two sets of questions:

- *How to characterize the interdependencies (physical, technical and functional, but also political, economic and contractual) within a system with the cover, the covered infrastructure, the surface and the surroundings?*
- *How do actors act in these situations of interdependence, and how their actions are coordinated?*

It is not possible to restore this analysis in all its complexity in the context of this paper. This work is primarily a feedback structured by an analytical grid, and cannot result into recommendations since there is not, as was been said before, an ideal organization of a project. However, we may point out:

- *The importance of intermediate structures to which is entrusted the project management of all or part of the project, in order to facilitate coordination: MPM for Euromed, KASIG in Karlsruhe, SEMAPA for Paris Rive Gauche, TUC rail for RER project Brussels.*
- *The importance of dialogue between stakeholders, in order to harmonize projects and their proper temporality.*
- *The weight of contractual arrangements, as has been mentioned in the analysis of legal aspects,*
- *The interest of innovative technical solutions, which requires the establishment of an independent project management, as transverse as possible, to promote a global vision of the project and produce a design that reflects this vision.*
- *The obvious interest in such projects, including a multitude of interfaces and where topography (leveling, paths,...) and structural solutions are central to negotiations, to establish a BIM approach, with a set of interactive databases shared among all stakeholders of the project, from the design phase and for the entire life cycle of the project.*

5. DIAGNOSIS AND EVALUATION TOOLS – FUNCTIONNAL ANALYSIS

The multiplicity of actors involved, the multi-scale consideration and the integration of temporality, added to contextual and technical constraints, result into a decision process that is often chaotic and rarely concerted. The objective of the research work conducted by

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 Laffréchine 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 coupe 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

Marina Maurin and led by Katia Laffréchine and Denis Morand (Université Paris-Est – Marne-la-Vallée – urban engineering team Lab'Urba), as part of Task 4, is to develop tools and assessment methods that allow players to make better founded and more consistent decisions. For this purpose a modeling work of covers has been developed.

Covers, which are significant urban operations, are confronted with various issues related to the urban context in which they fit, in particular with the infrastructure they cover. These, established and developed for the sake of mobility, urbanization and accessibility, are often felt and described locally (by local residents and / or users of the space) as "urban monsters" both visually and noise wise. Inconveniences related to air pollution and vibrations are also widely discussed. From a structural and technical point of view, the infrastructure serves as urban divide between the two sides it generates. This creates networks crossing difficulties and morphological partition of the urban territory.

The approach is first to observe and analyze the infrastructure covers in their context and immediate urban environment and also to conduct a theoretical reflection, the challenge being to capture, understand and grasp the complexity of urban areas including (or up to integrate) the civil engineering objects over road or rail transport infrastructure, to model and propose methods and assessment tools. The methodology presented in this paper is focused on the observation and analysis of urban infrastructure covers, most of which are referenced in the database developed under Task 1 of the project.

*The structural cover, fully or partially covering the transport infrastructure is considered as an **urban technical object**. The cover is positioned on one hand as a three-dimensional structural interface between an upper volume (urban area) and a lower volume (transportation infrastructure), and on the other hand in plane as an interface between two sides of the urban fabric. The definition of a cover cannot therefore be confined to the study of civil engineering works. This should incorporate a second perimeter, wider, corresponding to the territory of the urban development project in which it is set. Two important areas are emerging: **a structural perimeter and a project perimeter**. The first perimeter adopts the physical contours of the civil engineering work. It is the cover (red, Figure 3). The second perimeter corresponds to the urban area directly affected by the operation of coverage: the limits of*

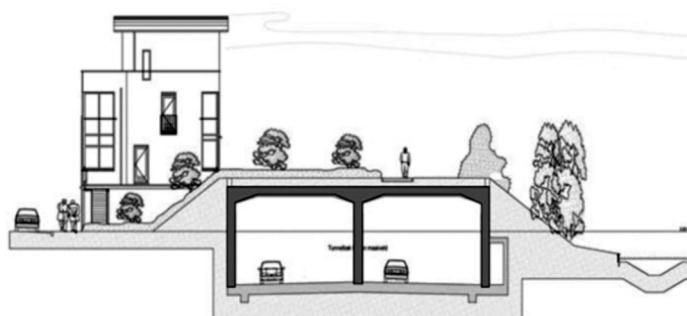
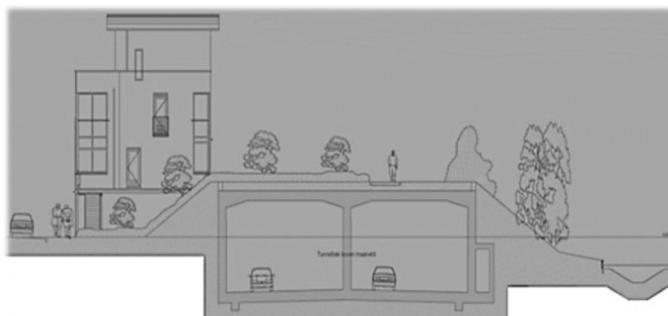


Figure 3 : Les différentes échelles de la couverture d'infrastructures - projet de Sijtwende en Hollande (Marina Fund-Maurin).
Figure 3: The different scales of a cover - Sijtwende project in Holland (Marina Fund-Maurin).





mètre 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, Figure 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, Figure 3).

Une autre représentation de ces deux périmètres est proposée Figure 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.

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 tache 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 / gène a été mené en utilisant la méthode NIAM. Cette modélisation fine a permis d'identifier le **conflict** 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

the urban development project around the cover (right, Figure 3).

Another representation of these two areas is provided in Figure 4. The structural perimeters and the urban development operation perimeter are shown schematically in plan and in the context of Porte des Lilas area in Paris.

*The system adopted in the framework of this research project is the **urban cover system** which encompasses the urban development area inside which the cover is built. This system is also qualified as the **cover environment**.*

Functional analysis of the urban transport infrastructure cover aims at providing a descriptive and structured model of the functioning of urban cover systems. It must be intelligible by all actors involved in these particular projects.

The analysis of the task 1 database clearly identifies that the covers are programmed to respond to issues of pollution (noise, atmospheric pollution, urban disconnection...). To clearly characterize these nuisances, the process modeling nuisance / trouble was conducted using NIAM method. This detailed modeling has identified the conflict between top and bottom. This conflict is introduced into the system analysis, as it reflects the purpose of the system "coverage in the urban environment." System analysis is conducted by the APTE method, method by which the main functions and constraints are identified and prioritized.

The cover is subjected to an external functional analysis. In other words, we focus upon the functioning and behavior of the cover in its environment. The choice to focus upon the engineering object has the advantage of identi-

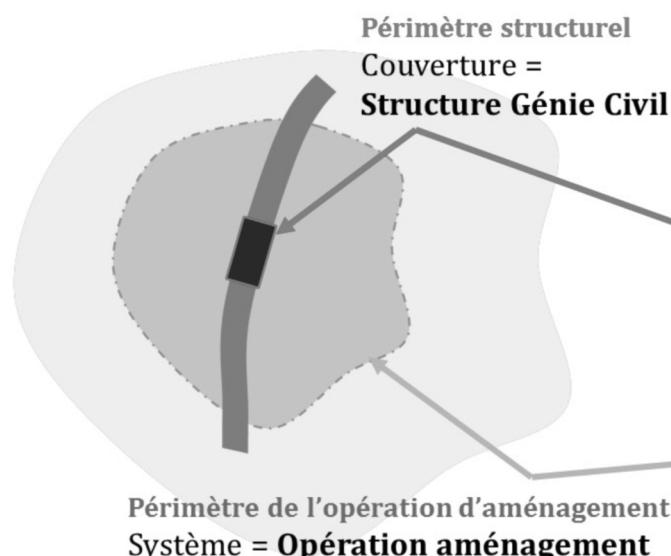


Figure 4 : Les périmètres considérés pour la couverture d'infrastructures (Marina Fund-Maurin).
Figure 4: The perimeters considered for a cover (Marina Fund-Maurin).

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 (Figure 5).

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, implanté 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

fying the overall operation of covering the infrastructure in its environment. Moreover, due to the durability of the structure and of its spatial boundaries, the internal functional analysis phase is similar to a structural analysis of civil engineering. This phase, whose purpose is the technical specification of the required structure is one part of the research work done in task 5 of the project, described in Chapter 6.

It is not possible within the scope of this paper to present the functional analysis that was conducted on the basis of the APTE method. However, we mention the definition of the main functions and of the constraint functions that have been identified.

The main functions express the interactions, induced by the cover, between two environments, or elements of the environment, or an environment and itself. The environment of the cover, or urban space, has been divided into four environments: mobile environment, equipped environment, inhabited environment, and active environment.

An urban space supports various activities of people. Referring to the population typology proposed and the associated supports, a decomposition of space appears logically: a mobile space, a living space, an active space and an equipped space. In this way each type of population is based on the associated space (mobile population in the mobile space, local population on the living space, working population on the active space, user population on the equipped space) to exercise its activity (Figure 5).

These four areas are well defined into a functional, non-geographic, typology. In this sense, they can be juxtaposed spatially. This breakdown is based on the four urban functions: Mobile City, Residential City, active city and equipped city. Precept adopted, implemented and used in a methodological and operational manner by the urban programming and planning agency Alphaville. These functions also echo the work of Le Corbusier and especially the teachings of the Charter of Athens. In practice, impact studies also use this division into urban functions to support their expertise. This model has the advantage of addressing the territory and the city under a functional (and systemic) approach based on both the urban composition and the practices of people.

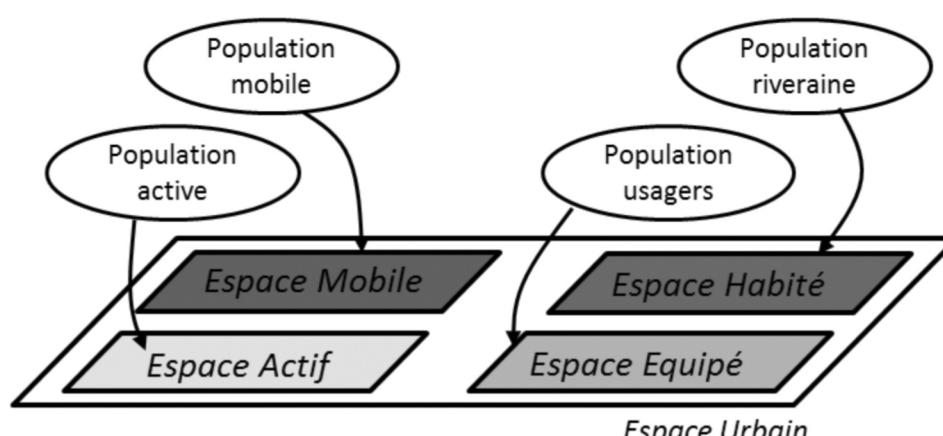


Figure 5 : Déclinaison de l'espace urbain en sous espaces et action des populations associées (Marina Fund-Maurin).

Figure 5: Division of the urban space in sub-spaces and associated populations (Marina Fund-Maurin).

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 liste ces fonctions en précisant les environnements extérieurs considérés.

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

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

The study of interactions between each of the four environments through the cover identified eleven main functions. Table 1 lists these functions while specifying outdoor environments considered.

FP	Function description	Environnement 1	Environnement 2
FP01	Create a proximity between mobile space and inhabited space / Ensure accessibility of inhabited space for people	Mobile environnement	Inhabited environnement
FP02	Protect the living space from environmental pollution generated by the infrastructure	Mobile environnement	Inhabited environnement
FP03	Create a proximity between mobile space and active space / Ensure accessibility of active space for people	Mobile environnement	Active environnement
FP04	Protect the active space from environmental pollution generated by the infrastructure	Mobile environnement	Active environnement
FP05	Create a proximity between mobile space and equipped space / Ensure accessibility of equipped space for people	Mobile environnement	Equiped environnement
FP06	Create a proximity between mobile space and mobile space / Ensure accessibility of mobile space for people	Mobile environnement	Mobile environnement
FP07	Protect the mobile space from environmental pollution generated by the infrastructure	Mobile environnement	Mobile environnement
FP08	Create a proximity between inhabited space and equipped space	Inhabited environnement	Equiped environnement
FP09	Protect the equipped space from environmental pollution generated by the infrastructure	Mobile environnement	Equiped environnement
FP10	Create a proximity between active space and equipped space.	Environnement actif	Environnement équipé
FP11	Create a proximity between inhabited space and active space	Inhabited environnement	Active environnement

Table 1: Main functions of the urban infrastructure cover (Marina Fund-Maurin).



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 liste ces fonctions en précisant les environnements extérieurs en interaction directe avec la couverture.

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'efficience 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

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

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.

6. 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 réglementaires et contraintes techniques,

Constraint functions express the direct interaction between an external medium or component and the cover. The study of the interactions of each of the four environments with the cover has identified nine constraint functions. Table 2 lists these functions and specifies the environments in direct interaction with the cover.

FC	Function description	Environment with direct interaction with the cover
FC01	Ensure the comfort of people on the mobile space	Mobile environment
FC02	Create areas available to the mobile space / Create mobile space	Mobile environment
FC03	Ensure the efficiency of the transport infrastructure	Mobile environment
FC04	Create areas available to the equipped environment	Equipped environment
FC05	Ensure the comfort of people on the equipped space	Equipped environment
FC06	Ensure the comfort of people on the active space	Active environment
FC07	Create areas available to the active space	Active environment
FC08	Create areas available to inhabited space / Create inhabited space	Inhabited environment
FC09	Ensure the comfort of people on the inhabited space	Inhabited environment

Table 2: Constraint functions of urban infrastructures cover (Marina Fund-Maurin).

The results of the functional analysis and the database established under Task 1 were the main inputs of task 5 described hereafter.

6. HOW THE URBAN CIVIL ENGINEERING MEETS THE FUNCTIONS AND CONSTRAINTS OF COVERS

Task 5 objective was to describe and analyze the urban civil engineering solutions that meet the issues of all kinds of cover projects, issues described and analyzed by the work of tasks 1 to 4. The work was divided into:

- typology, analysis and evaluation of heavy structures,
- typology, analysis and evaluation of light structures,



- 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.

6.1. 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 ».

- spacial top-down interface - Regulatory aspects and technical constraints,*
 - environmental improvements modules and “focus” on landscaping,*
 - synthesis of the answers to the expected functions.*
- The works of task 5 also include feedback from the covers of Paris Rive Gauche, already mentioned in the chapter on the state of the art.*

6.1. Typology, analysis and evaluation of heavy structures

A heavy structural cover is defined as a structure capable of supporting urban roads, landscaping and / or buildings while maintaining the functionality of the covered infrastructure. For the analysis we have identified four types of heavy cover:

- Vaulted structures, combining concrete or masonry structures with embankments, with the specific advantage to restore ground continuity.*

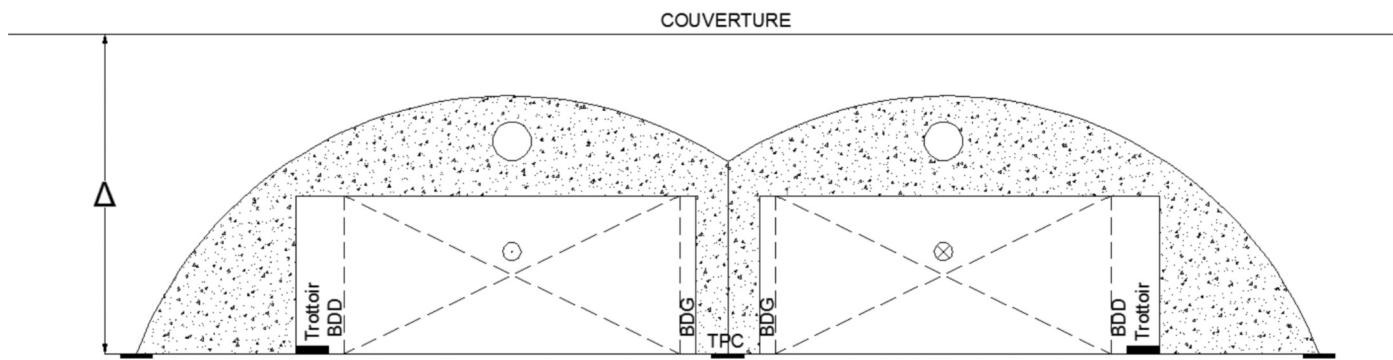


Figure 6 : Schéma de principe d'une structure voûtée.
Figure 6: Vaulted structure in outline.

- 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 ;

- Simple slabs**, whether solid slabs of reinforced or prestressed concrete, or beams and slabs structures, of steel construction, or composite steel and concrete.

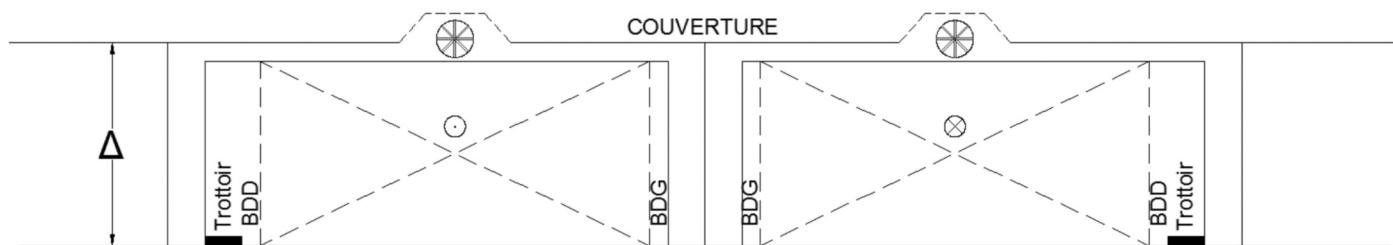


Figure 7 : Schéma d'une dalle simple.
Figure 7: simple slab in outline.

- 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 ;

- double slabs**, with two levels separated by a usable space (parking, traffic, networks), both levels being structurally connected by walls or struts to benefit from the large structural capacity resulting from it.

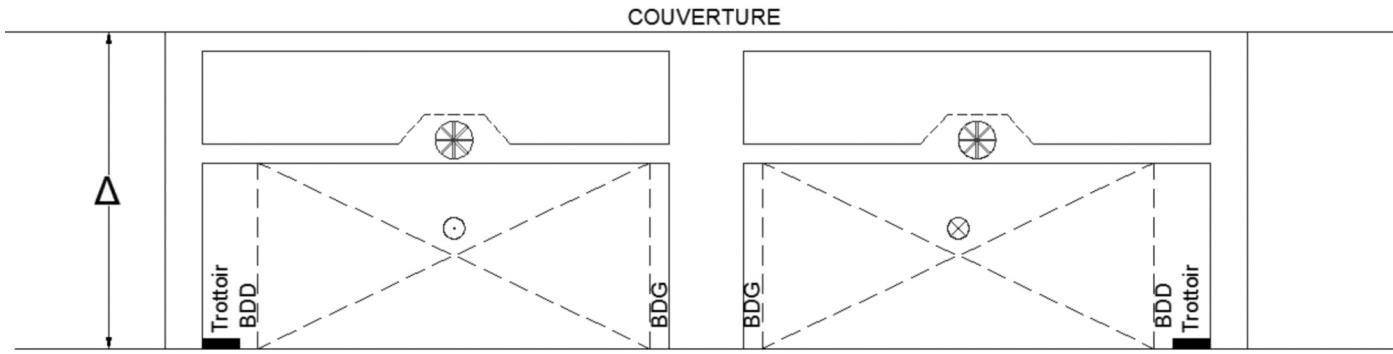


Figure 8 : Schéma d'une dalle double.
Figure 8: double slab in outline.

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

- **perforated slabs**, where the presence of openings can facilitate some functions, such as aerodynamics transparency.

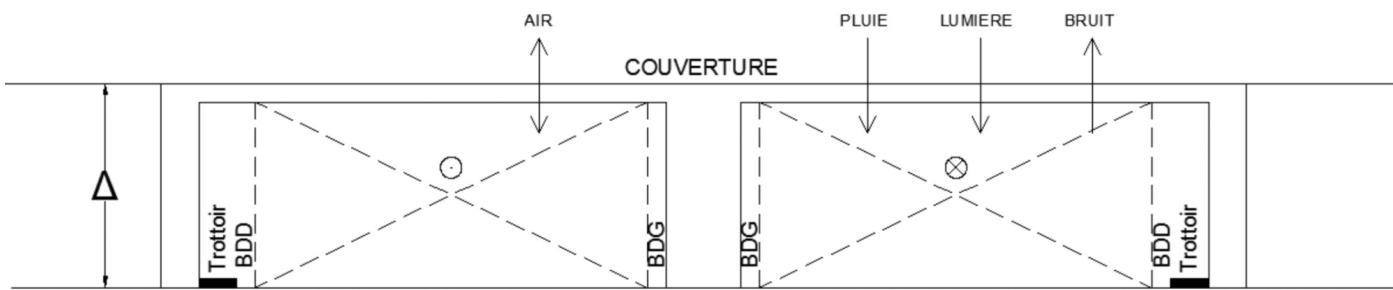


Figure 9 : Schéma d'une dalle ajourée en coupe.
Figure 9: perforated slab in outline.

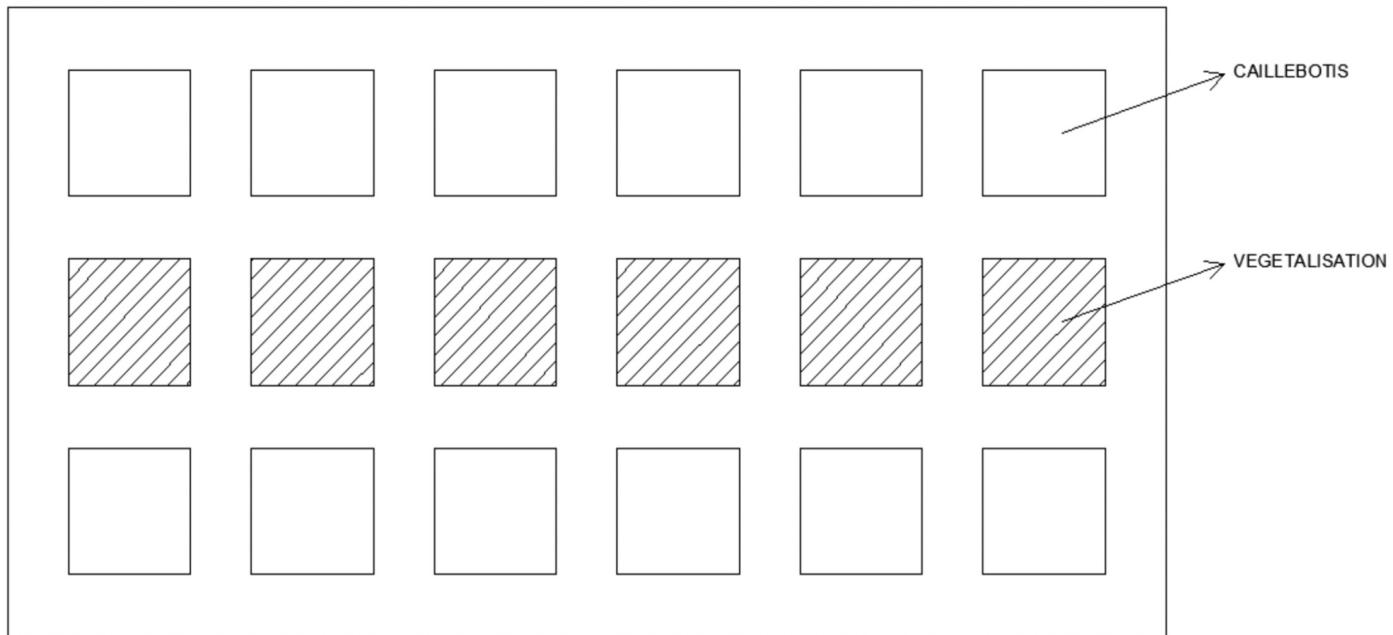


Figure 10 : Schéma d'une dalle ajourée, vue en plan. Les vides sont autant de modules dont la fonction peut évoluer au cours de la vie de l'ouvrage.

Figure 10: perforated slab, plane view. Openings function may evolve during the life cycle.



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. À 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.

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.

Each type of structure has been the subject of a preliminary study based upon two typical cases: covering a road infrastructure with 2 lanes in one direction and 3 lanes in the other, and covering a railway infrastructure including 2 lanes in each direction. In addition, for traffic roads, covers under 300 m in length have been distinguished from the longer ones to account for the impact of safety regulations on road tunnels. From the results of these preliminary studies, comparative evaluations of solutions have been established, primarily on cost criteria, and then on criteria related to the way functions are met.

Comparison on the basis of cost: We give (Figure 11 below) the results of these comparisons based on the type of way covered, and then on the type of structure, drawing the reader's attention to the fact that the indicated costs are theoretical and should be used only to compare solutions. This comparative analysis highlights that the cost of various covers types varies relatively little from one solution to another. No structural solution is significantly different from the other in terms of cost. This shows that the choice of a type of structure ought to be made primarily on the basis of site constraints, including topography, and functions that one wishes to prioritize. We'll see indeed in what follows that the different structures considered respond differently to the expected functions.

Covers are considered as a modification of the urban system, so we expect these structures to respond to functions. These functions have already been identified and grouped into three different categories according to the work of work of Task 4:

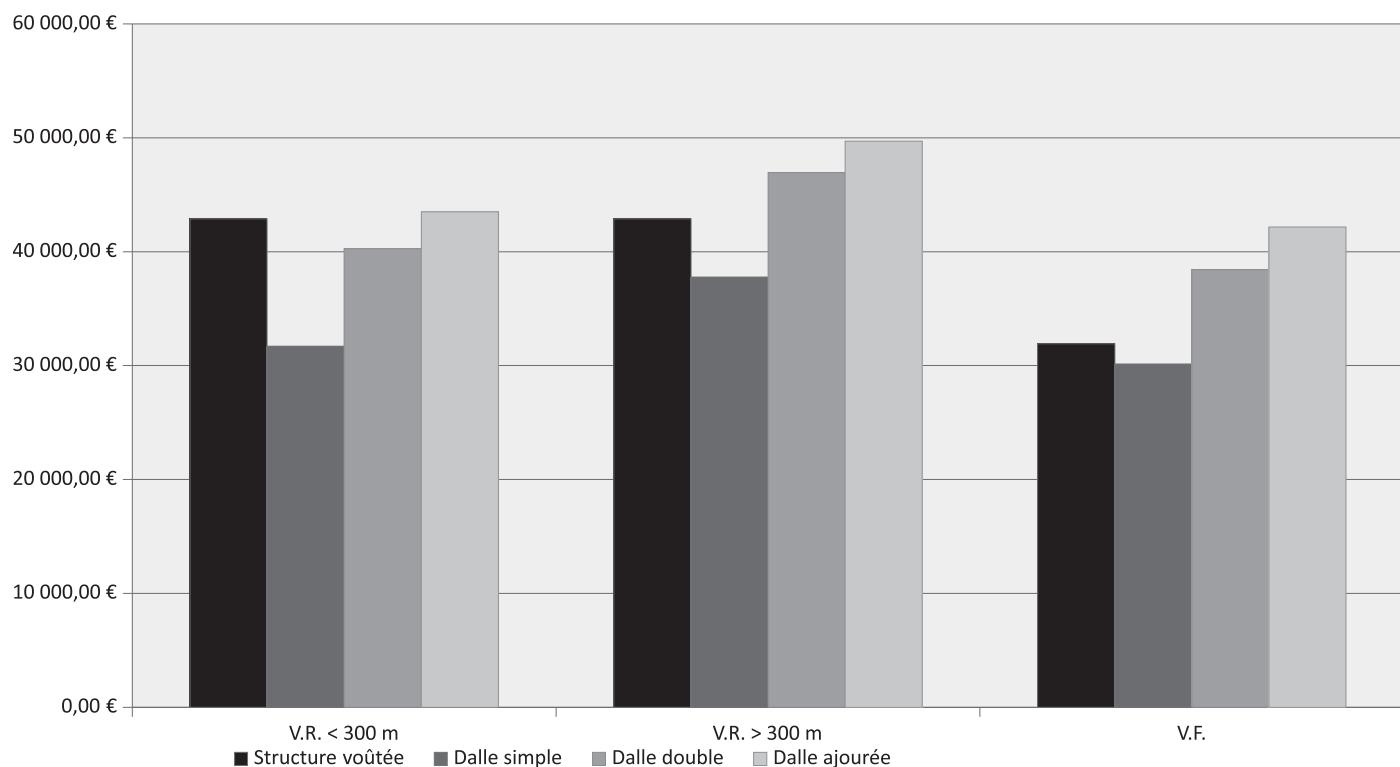
- **External functions**: those related to the primary objectives of creating covers,
- **Internal functions**: those related to the operation and use of the cover itself,
- **Specific functions linked to the construction feasibility**.

Analysis of structural typologies vis-à-vis the functions matrix led to the following conclusions:

- *The vaulted structure provides the best response when the main objective of the client is the reduction of infrastructure nuisances and landscaping. The embankment, inseparable from the vault, restores the continuity of the ground and is the perfect medium for creating a natural environment, reducing the negative impact of the infrastructure. It facilitates development of biodiversity and the creation of a friendly environment.*
- *The perforated cover has many advantages, including natural ventilation, and represents mainly, thanks to the flexibility of use of the openings, the most appropriate response to changes in functionality, which is a major sustainability factor.*



Prix global par mètre linéaire de couverture selon les voies franchies



Prix global par mètre linéaire de couverture selon les solutions envisagées

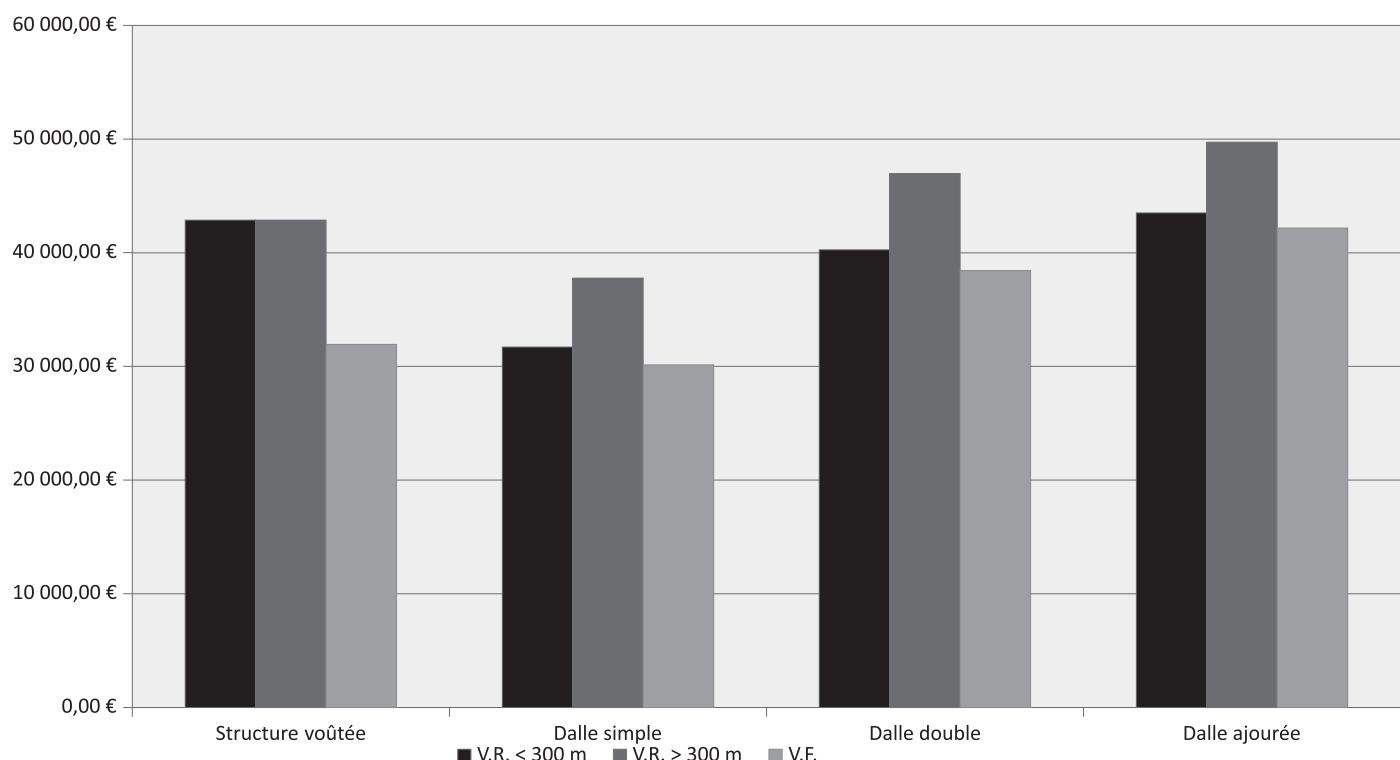


Figure 11 : Graphiques comparatifs du prix par mètre linéaire de couverture.
Figure 11: Comparison of costs per linear metre of cover.

- 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.

- The double slab, where the site topography allows it, provides a very appropriate response to the fluids network management, and provides the opportunity to create car parks, which is appropriate in particular when the buildings are located above the slab or supported by it.





6.2. 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 grid-shell 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 :

6.2. Typology, analysis and evaluation of light covers

Creating covers on road or rail infrastructure in urban areas often involves crossing wide spans over large areas. For this type of project, it is also desirable to minimize the number and size of support that can disrupt existing traffic. These aspects may lead to light structures options.

As compared with heavy structures, lightweight structures offer specific advantages:

- **Installation (assembly and dismantling):** a light structure is by essence easier and faster to assemble and dismantle than a heavy one. This is particularly important for construction under traffic.
 - **Modularity:** prefabrication, widely used in lightweight structures, facilitates deployment from elements, which can take place progressively. These structures allow the integration of modules whose functions could vary to meet the specific needs and issues (these concepts are developed further in the section “environmental modules”). Moreover, the lightness of these cover and the variety of materials and components that can be used, offer many possibilities: the surface appearance and functionalities (including environmental features) that may be associated with them are vast. These features allow also improvements of inside environments, by bringing natural light for example. They can bring comfort inside and outside.
 - **Carbon footprint:** the carbon footprint or more generally the life cycle impact of lightweight structures, often made of recycled materials, is more favorable than that of heavy structures. However unlike heavy structures, light covers are not accessible to traffic (pedestrian or automobile), and cannot be used to support buildings; they are not able to meet all of the functions identified as part of Task 4, but essentially the functions of protection of environmental pollution and comfort.
- Several types of light covers were identified and analyzed :*



- **Voûtes bidimensionnelles :**



Figure 12 : voûtes bidimensionnelles.
Figure 12: bi-dimensional vaults.

- **Bi-dimensional vaults:**

- **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.
Figure 13: spacial shell.

- **Spacial shells:** *these structures are very efficient in terms of material quantities.*

- **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.
Figure 14: Gridshell.

- **Gridshells:** *These structures are also very optimized, with the advantage of being assembled with small standard elements.*

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



Figure 15 : voûtains sur poteaux et poutres.
Figure 15: vaulted roof.

- **Vaulted roofs:**





- **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.
Figure 16: glass walls.

- **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.
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 encastrements au niveau des mâts ou structures portant les toiles.



Figure 18 : toiles tendues.
Figure 18: tension fabrics.

- **glass walls:** These walls are associated with supporting cable networks to form extremely light structures.

- **Nexorades:** structures built on the principle of nexorade are designed with longitudinal elements linked to each other by pairs. This principle allows a simple assembly process.

- **Tension fabrics:** tension fabrics structures are based on the principle of minimal surfaces (that is to say the smallest of surfaces that fills a given contour) and of their stability. This type of light structure can cover large areas with little material while minimizing the number of vertical supports.

6.3. 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 syndics et les riverains est également primor-

6.3. Spacial top-down interface - Regulatory aspects and technical constraints

The regulations applying to road or rail tunnels require implementing a number of safety features and equipment. These have a significant impact on the surface above, especially emergency exits and accesses, or ventilation equipment. The magnitude of these emergencies may be limited by an appropriate design, in close cooperation with authorities to meet their requests. Consultation with local councils, trustees and residents is also essential to find solutions that are accepted by all stakeholders.



diale 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'expliquer 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.

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 fumées 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 	<ul style="list-style-type: none"> • 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

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

The approach to reduce the impacts on the environment of a covering project is broken down into a series of steps, punctuated by numerous exchanges with various stakeholders. Our study of the top-down interface does not aim at creating a technical solutions guide, which would be impossible in view of the diversity and complexity of the subjects, but rather at clarifying the process of a design incorporating environmental parameters. This can be divided into three areas described below. Each of these areas has been the subject of one or more particular developments (called "themes") to address the major issues.

The first area relates to the covered length, which is a key parameter. For this reason the theme "optimize coverage length" was widely developed with regard to road infrastructure covers. Indeed, the regulatory requirements are based on thresholds: 300m, 500m, 800m, 1000m, 1500m, 3000m and 5000m. The different possible functional solutions and their advantages and disadvantages, are presented in Table 3 below, for road infrastructure.

Solutions	Specific features & equipments	Advantages	Disadvantages
1. A succession of short covers (below 300m) without ventilation	<ul style="list-style-type: none"> • 1 emergency exit per tube and per cover • 1 safety recess and one fire recess per tube and per cover 	Low construction and operation costs	Need of an opened trench >100m between 300 m segments (issues of visual impact, noise and pollution)
2. Middle size cover (300 to 500m) with longitudinal ventilation	<ul style="list-style-type: none"> • 2 safety exits per tube • 3 safety recesses and 2 to 3 fire recesses per tube • Upper recesses to locate ventilators • Fire walls at each extremity 	Limited construction and operation costs	<ul style="list-style-type: none"> • Interdiction of traffic congestion • Interdiction of dangerous products transport • Limited fire safety regulations • Length limited to 500m
3. Long cover (>500m) with transverse ventilation	<ul style="list-style-type: none"> • Safety exits every 200 m • Safety recesses every 200m • Upper or lateral recesses to locate ventilators • Fire walls at each extremity 	Minimal impact on the environment	<ul style="list-style-type: none"> • High construction and operation costs • Safety issues if dangerous product transport is allowed under traffic congestion

Table 3: advantages and disadvantages of covers types in view of the covered length.



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. À 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.

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

In practice provisions required by the regulations are considered on a project by project basis. Safety is considered globally, and equipments that are not clearly imposed by regulations may be required to obtain permission to operate.

The second area relates to the insertion in their environment of emerging structures. The theme “integration of emergencies created by the cover” particularly addresses the integration of technical facilities, ventilation works and emergency exits. For example, two well integrated emergencies: the ventilation stack of the Croix Rousse tunnel in Lyon and an emergency exit on the banks of the River Seine in Paris.

To support this theme, we thought it important to develop the topic related to the control of pollutants. An underground roadway does not generate more pollution than an open air one. However, a tunnel has an influence on the



Figure 19 : cheminée de ventilation du Tunnel sous la Croix-Rousse à Lyon.
Figure 19: ventilation shaft from Croix-Rousse tunnel in Lyon.



Figure 20 : issue de secours sur les quais de la Seine à Paris.
Figure 20: safety exit on the River Seine banks in Paris.

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'usager et coût.

	Sécurité des travailleurs et des usagers	Gêne à l'usager	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

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

concentrations of pollutants since these are concentrated and released in a few locations. Indeed, an underground structure ventilation solution must integrate a large number of parameters (traffic conditions, local weather conditions, urban density, discharge points...). Several air treatment techniques such particulate filtration, denitrification or bio-filtration were studied in order to understand their advantages and disadvantages and their possible applications.

The third area relates to works implementation on site. The theme “sharing traffic space during the construction phase” indicates the solutions to carry out work on operating roadways or railways, while ensuring the safety of people (users and workers), the continuity of operation, as well as the social acceptability (ensuring sufficient traffic capacity, preservation of the environment). Three types of actions can be implemented according to the requirements and constraints:

- permanent neutralization of traffic lanes
 - total closure of the facility
 - temporary neutralization of lanes with movable barriers
- Traffic study is a key element for selecting adequate traffic management methods. Consultation with all local stakeholders is essential for the success of the project. The table below shows the results of this part, evaluating the various solutions against three fundamental criteria: safety of workers, discomfort to the user and cost.

	Safety of workers and users	Generated trouble	Cost
Permanent neutralization of lanes	Good	Traffic congestion at peak hours	Low
Total closure of the facility	Optimal	Long time traffic diversion	High
Temporary neutralization of lanes with daily moved barriers	Acceptable	Minimal	Very high

Table 4: comparison of traffic management solutions during works implementation.

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 Rousse à Lyon a permis d'illustrer cette démarche.

6.4. 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).

Finally, an additional study was developed around the theme of “the perception of underground structures.” Indeed, the use of underground environments are developing and this development requires to conduct reflections on the perception of these environments by users. This theme aims at identifying the parameters which require special attention to make underground spaces tailored to their users, in order to reconcile the needs, constraints, design and implementation, and user comfort (acoustic, geometry, architecture, so forth.). A case study of the of Croix Rousse tunnel in Lyon has illustrated this approach.

6.4. Environmental improvements modules and “focus” on landscaping

Whether it is a heavy structure or a light structure, it may be the support of equipment for acting on the environment, to reduce or offset its impacts. Different types of solutions are presented:

- *passive solutions, providing functions / performance (comfort, nuisance management, ...) without energy supply.*
- *bioclimatic solutions, interacting with the local natural environment (climate, wind, sunlight, topography, ...)*
- *Alternative solutions: implementation of renewable energy.*

Environmental solutions are considered as modules reported locally, adaptable to different site configurations, and removable or interchangeable during the life of the structure. They take advantage of the exchange between upper and lower levels :

- *To treat nuisances at the interface between the inside and outside*
- *To produce / make available renewable resources to meet local needs.*

To achieve these functions, micromodules can be installed. These are standard elements, removable, which can perform different functions:

- *Acoustic module: absorbing acoustic panel / insulation.*
- *Photovoltaic energy module: photovoltaic electricity for uses / local needs.*
- *Energy module “Savonius” : wind power generation for uses / local needs.*
- *Lighting module: basic lighting or reinforcement, signage or animation (LED, etc.) self-powered.*
- *Module collector: rainwater collecting and remote storage for local use*
- *Retention module: rainwater retention by vegetation to compensate for the waterproofing of roads*
- *Filtering module: vegetated air filter.*
- *Organic habitat module: ecological habitat (insect niches)*
- *Membrane Module: waterproofing between top and bottom, venturi effect (thermal draught).*



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'imperméabilisation 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.

6.5. 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.

7. 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.

The choice of these modules depends upon the context of the operation: site configuration, climate, sensitivity of the local urban space.

Revegetation can meet several functions:

- *alternative economic function: generating resources for urban agriculture*
- *aesthetic and ambiance improvement: hiding transport infrastructure, demineralizing urban spaces, floral gardening, artworks exhibition, etc*
- *bioclimatic functions: contributing to the reduction of urban temperature, promote animal biodiversity, limiting soil sealing, etc*
- *dépolluting functions:*
- *reduction of noise and visual pollution*
- *bio-protective function: allow the development of animal biodiversity*

The cover may indeed be used as a support to sustainable development.

6.5. Synthesis of the answers to the expected functions

Task 5 reviewed and analyzed solutions for a comprehensive and coherent approach to the design and construction of covers, respectful of sustainable development criteria, and proposed civil engineering solutions to previously defined functions. It also helped developing a tool for analysis and evaluation of cover projects, in the form of a matrix indicating the capacity of a technical solution to meet a set of functions, while allowing to weight the evaluation criteria: functionality, environmental protection and urban integration in particular.

7. CONCLUSION

CANOPEE project explored the identity and complexity of projects of transport infrastructure covers in urban environment, and proposed a global and multidisciplinary approach. The assumption that these covers are a particular type of civil works has been fully verified. The final report and the synthesis of the work will carry a wealth of information, both feedback and proposals for improvement and innovation, which will thus be made available to all those who engage in such projects at different levels of responsibility and at different stages.