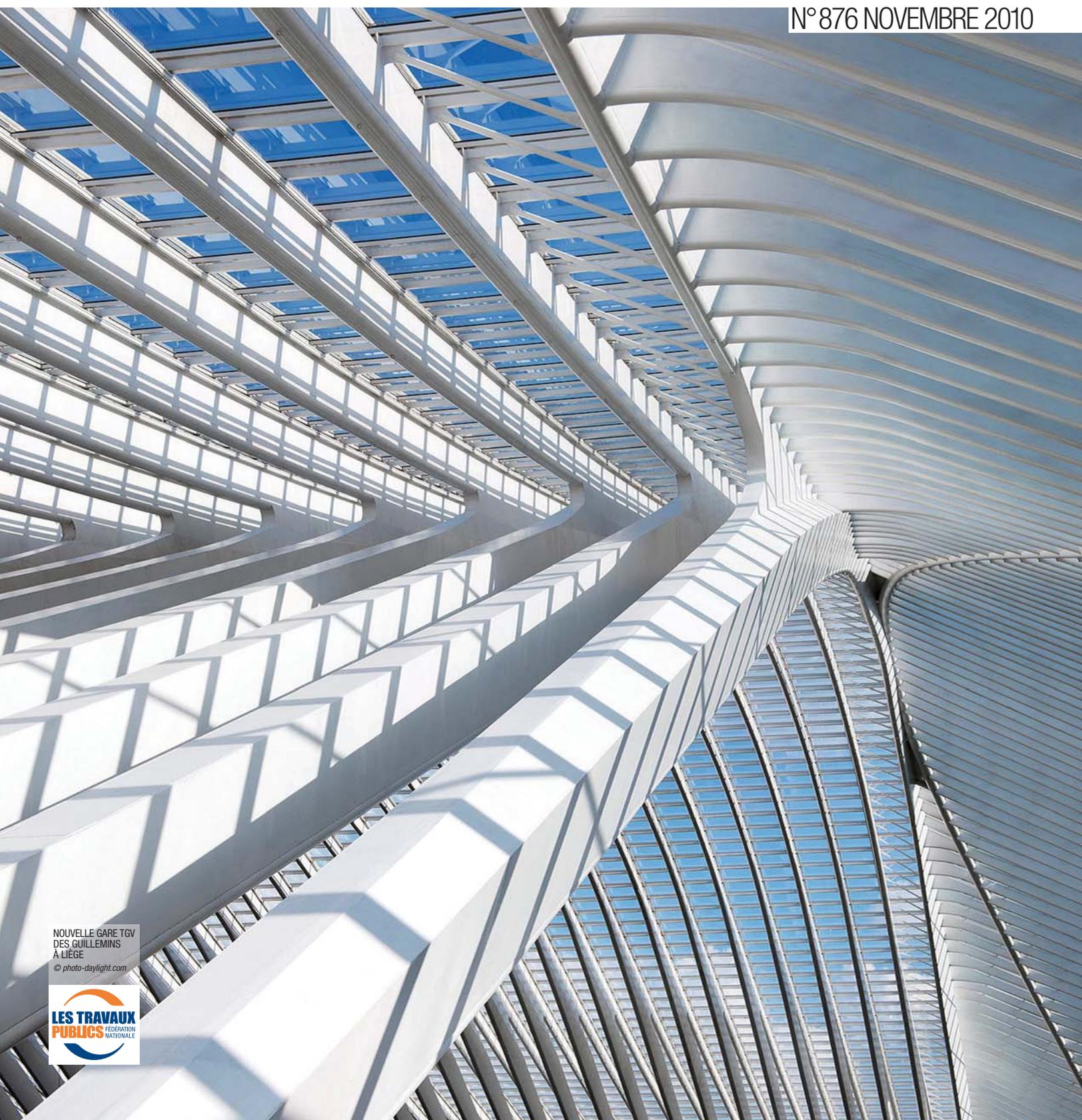


# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**VILLE DURABLE. LE PROGRES PASSE PAR LA MESURE. LA VILLE NUMERIQUE. REHABILITATION D'UNE FRICHE INDUSTRIELLE. GEOTHERMIE : PROJET ENSTA PARISTECH. NOUVELLE GARE TGV DES GUILLEMINS A LIEGE. GARE DE PARIS SAINT-LAZARE : UNE MUTATION AMBITIEUSE. LA RENOVATION DES HALLES DU BOULINGRIN : LA MODERNITE COMME AU PREMIER JOUR**

N°876 NOVEMBRE 2010



NOUVELLE GARE TGV  
DES GUILLEMINS  
À LIÈGE

© photo-daylight.com



**Directeur de la publication**  
Patrick Bernasconi**Directrice déléguée**  
**Rédactrice en chef**  
Mona Mottot3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03  
Email : mottotm@fnfp.fr**Comité de pilotage**Laurent Boutillon (Vinci Construction  
Grands Projets), Jean-Bernard Datry  
(Setec TPI), Philippe Jacquet (Bouygues),  
Stéphane Monleau (Solétanche Bachy),  
Bruno Radiguet (Bouygues), Claude  
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion  
(Systra), Jean-Marc Tanis (Egis), Michel  
Duviard (Egis), Florent Imbert (Razel),  
Mona Mottot (FNTP)**Ont collaboré à ce numéro****Rédaction**  
Marc Montagnon,  
Monique Trancart  
**Secrétariat de rédaction**  
Julia Deck**Service Abonnement et Vente**  
Com et Com**Service Abonnement TRAVAUX**  
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot  
92350 Le Plessis-Robinson  
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22  
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32  
Email : revue-travaux@cometcom.frFrance (10 numéros) : 190 € TTC  
International (10 numéros) : 240 €  
Enseignants (10 numéros) : 75 €  
Étudiants (10 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)**Publicité****Régie Publicité Industrielle**  
Xavier Bertrand - Nourredine Bennai  
9, bd Mendès France  
77600 Bussy-Saint-Georges  
Tél. : +33 (0)1 60 94 22 27  
Email : bertrand@rpi.fr - bennai@rpi.fr**Site internet** : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)**Réalisation et impression****Com'1 évidence**  
8, rue Jean Goujon - 75008 Paris  
Tél. : +33 (0)2 32 32 03 52  
Email : contact@com1evidence.com**Maquette****Idé Edition**La revue Travaux s'attache, pour l'information  
de ses lecteurs, à permettre l'expression de  
toutes les opinions scientifiques et techniques.  
Mais les articles sont publiés sous la  
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se  
réserve le droit de refuser toute insertion, jugée  
contraire aux intérêts de la publication.Tous droits de reproduction, adaptation, totale  
ou partielle, France et étranger, sous quelque  
forme que ce soit, sont expressément réservés  
(copyright bu Travaux). Ouvrage protégé ;  
photocopie interdite, même partielle  
(loi du 11 mars 1957, qui constituerait  
contrefaçon (code pénal, article 425).Editions Science et Industrie SAS  
9, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n°0111 T 80259  
ISSN 0041-1906**« VILLE DURABLE :  
MOBILITÉ, ÉNERGIE, ENVIRONNEMENT »**

© DR

**M**obilité, Énergie, Environnement :  
ce triptyque est au cœur des réflexions  
sur la Ville Durable. Il est indispensable  
de mettre en relation ces trois champs  
pour s'attaquer aux défis considérables que les  
sociétés urbaines doivent relever : saturation  
des grands axes de communication, rayonnement  
inégal des transports collectifs, pollutions et  
changement climatique, besoin de coordination  
des gouvernances urbaines, usage et reconversion  
du foncier, etc. Encore trop considérées isolément,  
ces difficultés, hétérogènes en apparence, sont  
étroitement liées les unes aux autres, et seule  
une approche globale permet d'y répondre.

Ce nouveau numéro de la revue Travaux, par la  
diversité et la richesse des témoignages recueillis,  
illustre cet intérêt d'envisager simultanément  
les différents enjeux de la « constellation » ville  
durable. Les projets présentés sont autant  
d'exemples d'avancées concrètes pour des  
solutions nouvelles, efficaces et réalistes  
aux problèmes que rencontrent les grandes  
métropoles. Ces initiatives montrent que la  
dynamique d'expérimentation et d'innovation  
est bel et bien engagée, tout comme la mise  
en synergie des acteurs de l'urbain durable.  
Parmi eux et avec eux, ADVANCITY, le pôle  
de compétitivité de la ville durable et des éco-  
technologies urbaines, rassemble autour de projets  
d'innovation collaboratifs PME, grands groupes,  
structures académiques et collectivités locales.

La conscience, qu'ont maintenant les parties  
prenantes, de la nécessité d'agir à brève  
échéance pour une urbanisation plus soutenable,  
se traduit déjà sur le terrain comme le montrent  
les sujets développés : de plus en plus de  
bâtiments éco-efficients sortent de terre, tandis  
que les principes d'une ville « post-carbone »  
s'intègrent aux démarches de rénovation  
de l'existant ; méthodes et outils innovants  
permettent d'optimiser délais et consommations  
des chantiers ; les capteurs intelligents cernent  
de mieux en mieux la performance énergétique ;  
enfin, de nouvelles formes de mobilité émergent,  
s'expérimentent et se font adopter.

Chacune de ces avancées participe de la refon-  
dation du modèle urbain et industriel. Plus que  
les additionner, il faut les associer pour nourrir  
ce qui peut être un observatoire et un laboratoire  
« vivants » de la Ville. C'est le projet d'IEED<sup>(1)</sup>  
qu'ADVANCITY et ses partenaires présentent  
au Commissariat Général à l'Investissement (CGI),  
en charge du Plan d'Investissements d'Avenir.  
Cet outil d'accélération de l'innovation urbaine  
au service de nos métiers, situé à la Cité  
Descartes de Marne-la-Vallée, au cœur du  
cluster Développement Durable du Grand Paris,  
cristallisera offres et services innovants, à la fois  
porteurs d'un nouveau mode de fonctionnement  
urbain mais aussi créateurs de valeur pour nos  
entreprises, et d'attractivité pour les territoires.

(1) - **IEED** : Institut d'Excellence dans le domaine  
des Energies Décarbonées.

**THIERRY DELARBRE**  
DIRECTEUR GÉNÉRAL D'ADVANCITY  
LE PÔLE DE COMPÉTITIVITÉ DE LA VILLE  
DURABLE ET DES ÉCO-TECHNOLOGIES URBAINES

# LA FABRIQUE DE LA CITÉ INVENTE LA VILLE DE DEMAIN

EN SUSCITANT LES ÉCHANGES ENTRE LES DIVERS ACTEURS QUI RÉFLÉCHISSENT À L'AVENIR DE LA VILLE, LA FABRIQUE DE LA CITÉ OFFRE UN LIEU DE RENCONTRE ORIGINAL POUR ALIMENTER LA RÉFLEXION SUR LES GRANDS ENJEUX URBAINS. L'OBJECTIF AFFICHÉ EST D'AILLEURS AUSSI AMBITIEUX QUE PASSIONNANT : INVENTER AUJOURD'HUI LA VILLE DE DEMAIN !



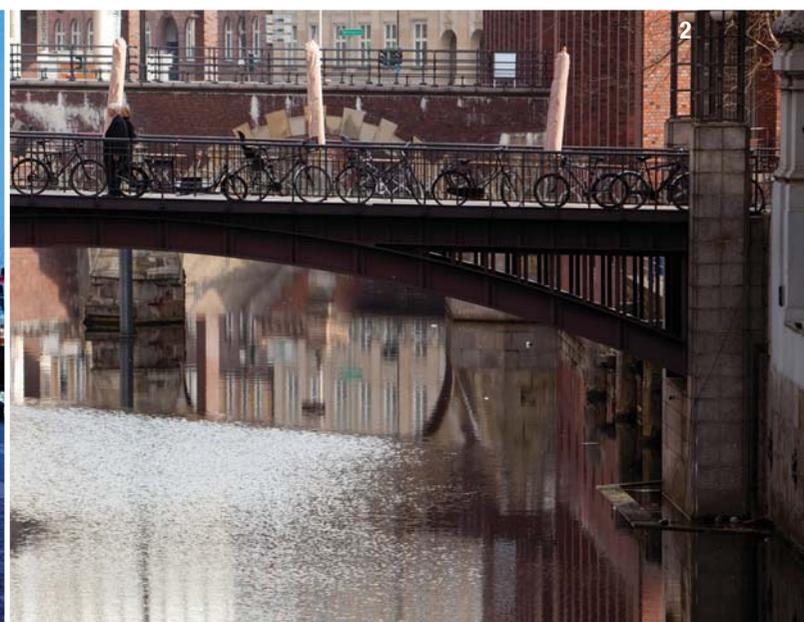
## ENTRETIEN AVEC RÉMI DORVAL, PRÉSIDENT DE LA FABRIQUE DE LA CITÉ.

PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-PHILIPPE DUPEYRON

### Comment est née l'idée de la Fabrique de la Cité et qui réunit-elle ?

La ville concentre aujourd'hui la plupart des grands enjeux sociétaux : la prise en compte de l'environnement, la mobilité, l'emploi ou la mixité sociale sont désormais des piliers de toute réflexion sur l'avenir des villes. C'est dans ce contexte que le groupe Vinci a décidé en 2008, sous l'impulsion de son Président Yves-Thibault de Silguy, de créer la Fabrique de la Cité, apportant ainsi sa pierre à l'édifice. Cette démarche est d'autant plus légitime qu'à travers ses nombreux métiers, le groupe couvre une très large palette des activités qui concourent à la fabrication des villes. Pour Vinci, c'est donc une approche de responsabilité sociétale qui a

conduit à la constitution de ce lieu de rencontre et de débats. Avec cette démarche, nous avons comme objectif d'alimenter les réflexions sur l'innovation urbaine en réunissant des personnalités issues du monde de l'entreprise (constructeurs, sociétés de services, urbanistes, architectes), des décideurs publics et des experts du monde universitaire. La richesse des travaux provient de cette confrontation des idées entre ces différents acteurs qui œuvrent tous pour le futur de nos villes. C'est d'ailleurs ce qui fait notre originalité : si de nombreux organismes réfléchissent sur le thème de la ville (notamment des instituts de recherche), peu proposent un lieu de rencontre aussi ouvert aux divers points de vue que la Fabrique de la Cité. Nous avons également inclus



une forte dimension internationale en nous intéressant aux expériences menées partout sur la planète et en étudiant les diverses problématiques qui se posent dans les différentes régions du monde.

### Justement, existe-t-il des disparités dans la vision de la ville de demain selon l'endroit dans le monde où l'on se trouve ?

La question de la ville de demain se pose partout avec la même acuité mais les modalités de sa mise en œuvre sont parfois bien différentes. Il existe en effet une grande diversité de situations qui débouche sur des problématiques différentes. Prenons l'exemple des pays émergents à forte croissance démographique, souvent amplifiée par l'exode rural des populations : des mégapoles regroupant parfois plusieurs dizaines de millions d'habitants sont en train de se former, avec le lot de problèmes qui en découle (transport, pollution...). Au contraire, d'autres villes ont tendance à se dépeupler : c'est le cas de Berlin où la disparition de nombreuses industries et une démographie peu dynamique ne vont pas sans poser certains problèmes insoupçonnés il y a quelques décennies. À titre d'exemple, la diminution des besoins en eau diminue le pompage dans la nappe phréatique, ce qui entraîne une remontée de celle-ci et des problèmes d'inondations. Si la création de villes nouvelles à la pointe des préoccupations environnementales est un véritable laboratoire d'idées afin de trouver de nouvelles solutions (à l'image de

## LA FABRIQUE DE LA CITÉ : SÉMINAIRES ET THÈMES DE RÉFLEXION

**Chaque année la Fabrique de la Cité organise un séminaire international. Une étude spécifique est publiée à cette occasion, la dernière en date porte sur l'attractivité des villes, publiée en 2010 par Futuribles (Centre indépendant d'étude et de réflexion sur le monde contemporain).**

**HAMBOURG (2010) : « la ville est vivante », à partir des évolutions démographiques de la ville, le séminaire mettait en exergue les aspirations des citoyens et la nécessaire anticipation des changements qui doivent être au cœur des politiques urbaines.**

**COPENHAGUE (2009) : « Villes durables : de la vision à l'action » a proposé une réflexion sur les formes urbaines, les expériences des éco quartiers dans le monde et sur les actions à mettre en œuvre pour construire la ville de demain.**

**LONDRES (2008) : « Mobilité en ville : changeons ! » s'est intéressé aux bouleversements auxquels la mobilité et les transports doivent faire face en milieu urbain aujourd'hui.**

**Le contenu de chaque séminaire est publié sous forme d'une synthèse disponible sur le site internet de la Fabrique de la Cité ([www.lafabriquedelacite.com](http://www.lafabriquedelacite.com)).**

Masdar à Abu Dhabi ou à une autre échelle, les éco quartiers un peu partout en Europe), nous ne devons pas oublier que les enjeux principaux se situent encore dans les villes actuelles et dans leur adaptation. En France, chaque année la construction neuve ne représente qu'un faible pourcentage du bâti existant : à ce rythme il faudrait un siècle pour que la totalité du parc tienne compte des nouvelles contraintes. On se rend donc bien compte que l'amélioration et la réhabilitation de l'existant (notamment au niveau énergétique) sont essentielles pour répondre aux urgences environnementales.

**1 à 4- Attractive, Hambourg compte 5000 résidents de plus chaque année. En 2010, La Fabrique de la Cité a travaillé sur la capacité des villes à absorber les évolutions démographiques en termes de services, d'infrastructures et, au-delà, d'identité collective.**

### Comment procédez-vous pour imaginer la ville de demain et quelles grandes évolutions peut-on d'ores et déjà anticiper ?

Nous ne nous autolimitons pas dans nos thèmes de réflexion. Toutefois, il est certain qu'il y a des domaines pour lesquels nous pouvons nous appuyer sur des données fiables afin d'élaborer des scénarios prospectifs solides. Les évolutions démographiques sont ainsi assez facilement prévisibles : le vieillissement de la population dans certains pays aura par exemple un impact fort sur les modes de vie et la ville doit dès aujourd'hui anticiper les nouveaux besoins qui en découleront, par exemple en termes de mobilité ou d'habitat. Le changement climatique, même s'il donne toujours lieu à certaines controverses, est également un facteur majeur de mutations. Les bâtiments et les transports sont responsables de plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre et toute politique urbaine doit réfléchir à la manière de limiter ces émissions. De même, les ressources naturelles qui permettent aux villes de fonctionner aujourd'hui ne sont pas inépuisables : il est urgent d'anticiper leur raréfaction et de trouver des solutions alternatives pour nous déplacer ou pour alimenter les villes de demain en énergie. Des évolutions sociologiques et sociales sont aussi en cours et accompagnent le mouvement d'urbanisation que connaît la planète aujourd'hui ; désormais environ la moitié de la population mondiale vit dans des villes mais dans les pays émergents le phénomène s'intensifie et on peut estimer qu'avant 2025, ►

PHOTOS © LUC BENEVELLO / PHOTOTHÈQUE VINCI - DR



les deux tiers des humains seront des citoyens. Or, la ville doit rester un lieu de lien social : à mesure qu'elle grandit, il faut trouver des solutions pour maintenir ce lien et éviter que certains quartiers ne se transforment en zones d'exclusion.

Enfin, les besoins de mobilité se sont considérablement accrus partout dans le monde.

Les déplacements doivent de plus s'adapter à l'accroissement de la taille des villes, aux contraintes énergétiques ou aux évolutions démographiques.

### Comment appréhendez-vous la « ville durable » et quelles conséquences cela aura-t-il pour les métiers du BTP ?

Il est maintenant évident que le modèle de croissance urbaine où les villes s'étendaient sans intégrer pleinement les enjeux environnementaux et sociaux est révolu. Nous savons aujourd'hui que la ville doit être appréhendée comme un système complexe et qu'une vision globale est nécessaire pour tenir compte de l'ensemble des besoins et des contraintes. De plus, on ne construit pas pour 20 ans mais pour beaucoup plus longtemps : il faut donc réfléchir dès maintenant aux évolutions auxquelles devront faire face les générations qui nous succéderont.

Pour les entreprises, au-delà de l'intensification nécessaire de la recherche-développement, cette approche système aura certainement des implications en termes de métiers et de savoir-faire. Les acteurs de la construction devront probablement chercher à appréhender, en interne ou en partenariat, de nouveaux domaines d'activité (gestion énergétique, infrastructures intelligentes...).

Ensuite, en termes de réalisation, l'évolution vers des systèmes urbains adaptables aux contraintes futures me paraît importante. Nous devons envisager des infrastructures plus flexibles, capables de s'adapter au fil du temps.

### Avez-vous développé des partenariats ?

Pour que la Fabrique de la Cité puisse jouer son rôle de creuset pour la réflexion, nous avons noué des partenariats avec des organismes universitaires. Cela nous permet notamment de faire appel à des spécialistes pour alimenter les débats grâce à des études. Des partenariats existent actuellement avec Paris-Tech et Sciences PO et d'autres sont envisagés, en particulier pour accroître la dimension internationale de la Fabrique de la Cité.

Nous souhaitons également nous ouvrir vers le monde associatif : il est, en effet, primordial que la ville

durable remporte l'adhésion de ceux qui la vivent au quotidien, à savoir ses habitants. Enfin, nous sommes sans cesse à la recherche des « nouvelles stars » de demain en matière de R&D sur les problématiques urbaines.

Nous souhaitons promouvoir les travaux de jeunes doctorants et ainsi offrir à nos membres une réflexion réellement innovante sur l'avenir de nos villes.

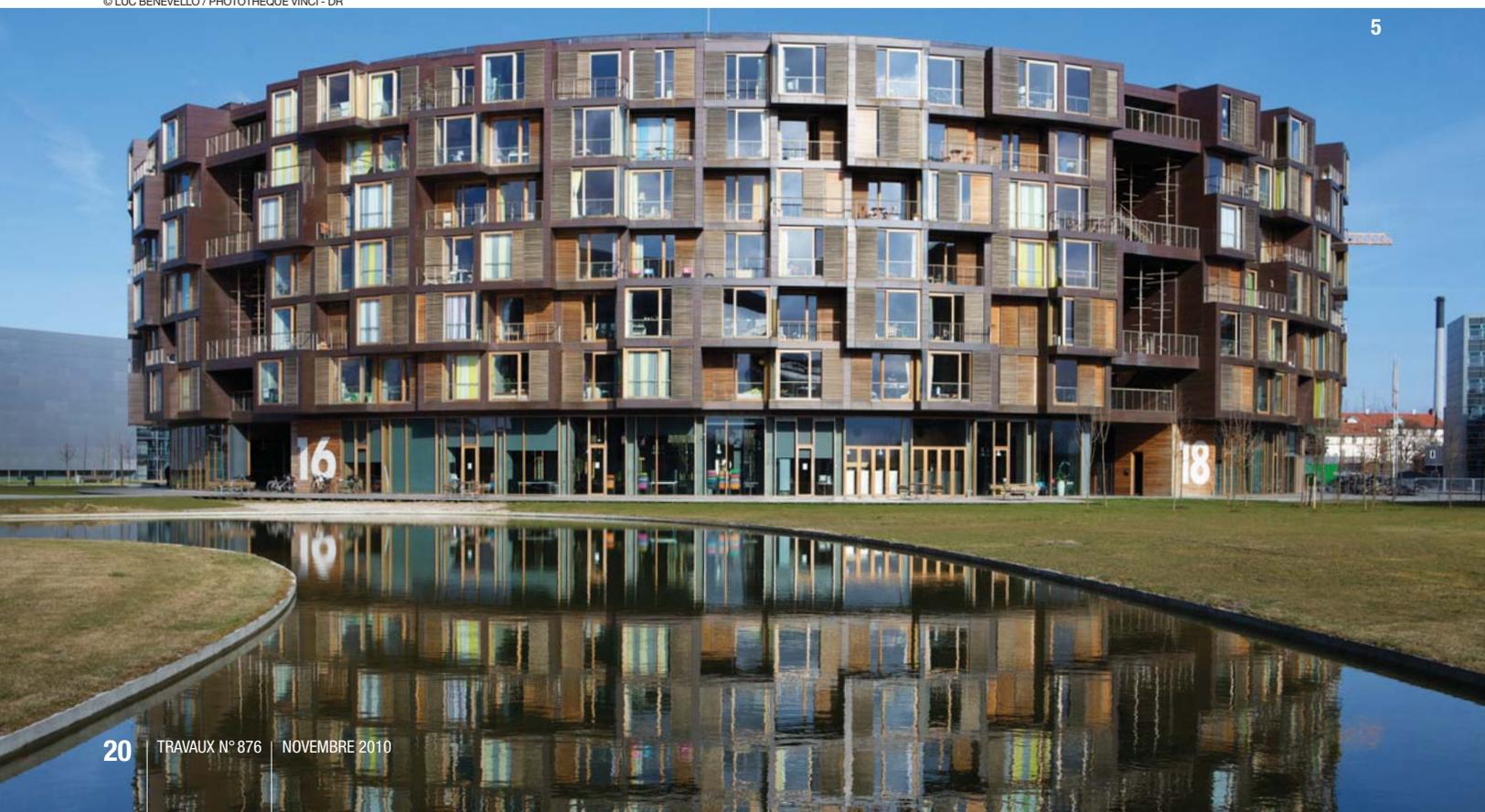
### Quelles ambitions et prochains thèmes de réflexions envisagez-vous pour la Fabrique de la Cité ?

Nous pouvons désormais affirmer que la formule mise en place par la Fabrique de la Cité a du sens : elle correspond à une méthode de travail originale et appréciée de tous car elle laisse une large place aux débats et fait participer des personnalités très diverses. Cette approche est donc très prometteuse et nous souhaitons intensifier nos activités avec plus de rencontres et diffuser encore plus largement les résultats de nos travaux. Nous réfléchissons également à nos prochains sujets de séminaires : par exemple, le thème de la périphérie des grandes villes me semble présenter beaucoup d'intérêt : ce sont des lieux où se concentrent de nombreuses difficultés (mobilité, habitat, exclusion sociale) et bien

comprendre les enjeux spécifiques à la périphérie doit permettre d'éclairer les choix pour la croissance future des villes. La question de la gouvernance est également fondamentale pour la ville de demain : qui décide et comment le processus de décision se déroule sont à mon avis des éléments de réflexion importants. Nous allons également consacrer une partie de l'année 2011 à réfléchir à la problématique de l'espace public dans la ville : quelle est sa place dans la Cité ? À quoi sert-il ? Comment évolue-t-il ? Quels sont les acteurs de l'espace public ? Les sujets ne manquent donc pas pour tenter d'apporter un éclairage durable sur l'avenir de la Cité ! □

**5- Les problématiques énergétiques et environnementales, la croissance démographique ou l'évolution des rapports sociaux bousculent les idées reçues sur les formes urbaines, comme à Copenhague, où la Fabrique de la Cité s'est interrogée sur « Comment convertir nos villes en cités écologiques ? »**

© LUC BENEVELLO / PHOTOTHÈQUE VINCI - DR



# DE NOUVEAUX OUTILS DE PILOTAGE POUR DES AMÉNAGEMENTS PLUS DURABLES

AUTEURS : CHRISTOPHE LONGEPIERRE, SYNTEC INGÉNIERIE - OLIVIER LESPINGAL, EGIS AMÉNAGEMENT

## UNE NOUVELLE APPROCHE DES PROJETS D'AMÉNAGEMENT

Avec l'entrée en vigueur des lois Grenelle et la réforme des études d'impact, on assiste à un changement profond dans les façons de concevoir et de réaliser les projets d'aménagement. Le temps d'aménager pour répondre à un seul besoin fonctionnel est révolu, et chaque projet est à présent appréhendé comme une opportunité pour restaurer un milieu, pour l'enrichir plus que pour compenser les impacts négatifs, tant sur les aspects environnementaux que sociaux, le tout dans une approche économique globale qui tient compte du cycle de vie complet des matériaux, des équipements et des ouvrages.

Les services rendus par la nature, qu'ils soient de « prélèvements » (les matériaux géologiques, la biomasse, les plantes médicinales, les animaux, les céréales...), de « régulation » (rôle joué par les écosystèmes pour réguler le climat, filtrer l'eau, séquestrer le carbone...) ou « culturels » (détente et loisirs, connaissance et découverte, esthétique, lieux de ressourcement), sont essentiels au bien-être de l'homme.

Aussi des notions nouvelles sont-elles à intégrer dans tout projet d'aménagement, repoussant sans cesse les limites du savoir et demandant à l'architecte et à l'ingénieur d'être plus innovants.

## L'INGÉNIERIE ENGAGÉE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

En février 2010, avec l'engagement volontaire signé par le MEEDDM et Syntec Ingénierie, les sociétés d'ingénierie se sont engagées, à travers le Carnet de bord développement durable (CBDD®), à suivre sur toute la durée de vie d'un ouvrage les objectifs de développement durable. La déclinaison de cet engagement dans tous les domaines de l'aménagement s'illustre différemment selon les domaines d'activités des sociétés d'ingénierie. Tendem Empreinte® est la déclinaison opérationnelle du CBDD® proposée par Egis dans les domaines de l'aménagement du territoire et des infrastructures.

## TENDEM EMPREINTE®, UNE MÉTHODE POUR FAIRE LES BONS CHOIX

**Dans les aménagements, nous sommes sans cesse amenés à gérer des contradictions comme, par exemple : est-il préférable d'orienter les parcelles plein sud ou plus essentiel de préserver les haies bocagères existantes ? La démarche Tendem Empreinte® met en relief ces contradictions afin d'aider les maîtres d'ouvrage et les concepteurs à faire les bons choix, ceux qui découlent d'une approche pluridisciplinaire, croisant les pratiques les plus vertueuses et les compétences de nombreux spécialistes (architectes, urbanistes, sociologues, environnementalistes, économistes, ingénieurs).**

### LE CAS DE LA ZAC DU VERT BUISSON À BRUZ (35)

À Bruz (35), pour l'aménagement de la ZAC du Vert Buisson, la SemBa a adopté la démarche Tendem Empreinte®. Initialisée au stade de l'avant-projet, la démarche a permis d'être exhaustif sur les objectifs de développement durable à atteindre. « Cela contraint le maître d'ouvrage à trouver des solutions. On fait des choix en connaissance de cause, comme par exemple supprimer les arbres en fond de parcelle pour libérer la vue », expliquent M. Spieser, PDG de la SemBa, et M. Bourges, son directeur. La démarche instaure un dialogue et des échanges permanents avec le maître d'ouvrage dans une recherche continue de progrès.



## ACCOMPAGNER LES OUVRAGES DURANT TOUT LEUR CYCLE DE VIE

Le CBDD® est un cadre méthodologique mis au point par Syntec Ingénierie avec le concours du CSTB<sup>(1)</sup> et de l'AITF<sup>(2)</sup> pour faciliter la mise en perspective par les donneurs d'ordres de leur démarche développement durable.

Ce carnet de bord est destiné à accompagner, à tous les stades de leur vie (dès la programmation d'un ouvrage et tout au long de son existence jusqu'à sa fin de vie), un ouvrage/équipement ou un ensemble d'ouvrages/équipements à travers des critères de référence régulièrement actualisés.

Tous les types d'ouvrages sont concernés, bâtiments, infrastructures, industriels, neufs ou existants.

C'est un support méthodologique composé d'un ensemble de tableaux permettant de définir puis de suivre des objectifs et des enjeux au regard du développement durable, spécifiques aux ouvrages/équipements considérés. ▷

### CBDD®

Le maître d'ouvrage reçoit un rapport correspondant à chacun des stades de vie du projet. Les prestataires successifs mettent à jour le carnet de bord DD selon les événements particuliers dans la vie de l'ouvrage (changement de destination, d'exploitant, modernisation et travaux divers, etc.) ou dans son contexte (lieu d'implantation, règlements, techniques nouvelles, stratégies de l'entreprise, etc.), et le transmettent au maître d'ouvrage.

### TENDEM EMPREINTE®

Tendem Empreinte® maintient un dialogue permanent avec le maître d'ouvrage. Les évaluations de la performance des aménagements sont faites à plusieurs reprises au cours d'un même stade de vie d'un ouvrage. C'est une démarche de projet pour Egis et un outil d'aide à la décision pour le maître d'ouvrage.

Le cadre est composé de quatre domaines (gouvernance, social/sociétal, environnement, économie) décomposés en 14 thèmes invariables et 60 objectifs et enjeux (à choisir dans une liste). L'utilisateur du CBDD choisit des objectifs et affecte à chacun d'eux un niveau de priorité : 1, 2 ou 3, par ordre décroissant d'importance. À chaque stade de vie du projet, les réponses opérationnelles et les résultats observés sont consignés dans un tableau.

### LE CBDD®, UN OUTIL DE SYNTHÈSE

La mise en œuvre du CBDD® permet au décideur de bénéficier d'une check-list développement durable pour éclairer ses choix. Elle facilite d'ailleurs l'approche en coût global. Le CBDD n'a pas vocation à se substituer aux certificats et labels existants attachés à un ouvrage, mais il permet de les appréhender dans une vision consolidée et organisée dans la perspective de satisfaire les attentes des donneurs d'ordres. Le CBDD® est un instrument de pilotage développement durable. Il s'agit de mettre en évidence le « pouvoir de l'excellence du DD » que le CBDD permet de concrétiser. Outil de synthèse de l'ensemble des exigences, des obligations légales, des décisions et des engagements relatifs à un ouvrage, il permet de les mettre en cohérence et de simplifier le recueil et l'exploitation des informations nécessaires. Il met ces données en perspective par rapport aux objectifs de développement durable. Il est applicable également à la gestion durable d'un patrimoine. Il peut être utilisé, en totalité ou en partie, par le maître d'ouvrage pour nourrir le dialogue avec des partenaires (commerciaux, politiques, techniques, etc.).

Le CBDD® comprend un préambule indiquant ses règles de tenue et de mise à jour, et trois parties à remplir tout au long de la vie de l'ouvrage :

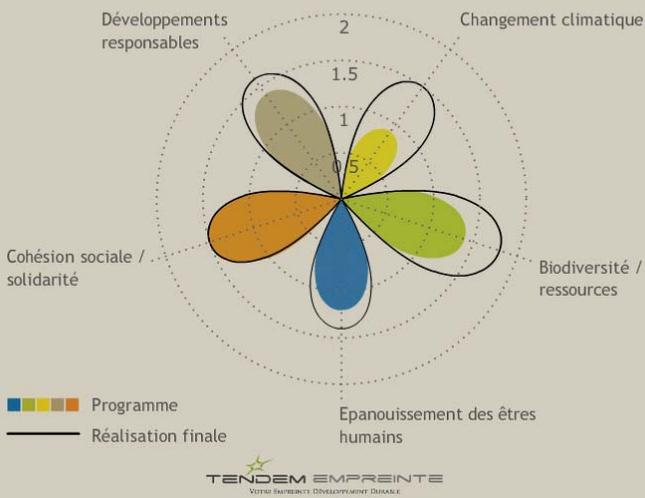
- La description évolutive de l'ouvrage et les enjeux de développement durable correspondant ;
- Une grille de suivi sous l'angle du DD, avec les paramètres ou indicateurs retenus par son utilisateur, une quinzaine par exemple, voire plus, et la manière d'évaluer chacun d'eux ;
- Une annexe documentaire comprenant la liste des référentiels et des modes opératoires utilisés, les archives pour la mémoire des modifications apportées avec le reporting et les relevés de mesures antérieurs, et tout document utile à la bonne tenue du CBDD®.

## LE CARNET DE BORD DÉVELOPPEMENT DURABLE, C'EST...

Tableau de bord de suivi développement durable (CBDD) avec des colonnes pour les domaines (Gouvernance, Social/Sociétal, Environnement, Économie) et des lignes pour les thèmes et objectifs.

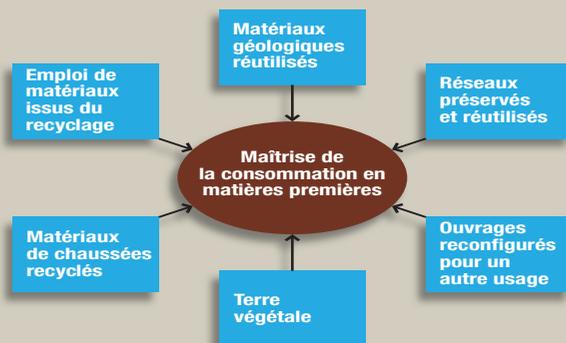
- 4 DOMAINES :** gouvernance, social/sociétal, environnement, économie
- 14 THÈMES INVARIABLES**
- 45 OBJECTIFS ET ENJEUX maximum** parmi 60 propositions
- 3 NIVEAUX DE PRIORITÉ (1, 2 et 3 par ordre décroissant)**

## EXEMPLE DE PROGRESSION DE L'EMPREINTE DÉVELOPPEMENT DURABLE ENTRE LE PROGRAMME ET LA RÉALISATION FINALE



**La formalisation des cibles retenues en « empreinte développement durable » est une véritable aide à la décision pour les élus et un outil de communication efficace vis-à-vis de la population.**

**Dans cet exemple, l'objectif de maîtrise de la consommation en matières premières se décline en six actions qui sont développées et chiffrées dans des fiches détaillées.**



L'élaboration du CBDD® peut commencer dès la genèse d'un projet.

Il a vocation à accompagner l'ouvrage de son « invention » à sa fin de vie, à intégrer les modifications ou transformations profondes qui lui sont apportées, et l'évolution du contexte (localisation, technique, réglementaire, etc.). Le CBDD® peut également être créé pour un ouvrage existant, sur les bases d'un diagnostic global et de travaux de mise à niveau si nécessaire, voire de réhabilitation. Il sera particulièrement intéressant pour le suivi des ouvrages réalisés en PPP ou en DSP.

### TENDEM EMPREINTE®, POUR OPTIMISER LES PERFORMANCES DURABLES

Tendem Empreinte® est un processus de conception et d'optimisation des performances durables basé sur des objectifs, des indicateurs, et surtout des actions qui renforcent le caractère durable des projets. Ce processus est en parfaite cohérence avec les principes du CBDD®. Il s'agit d'une méthode pragmatique et participative qui en fait un outil de dialogue et d'aide à la décision. À chaque grande étape, il est possible de visualiser les bénéfices et les impacts pluridisciplinaires des choix de programmation, de conception, de mise en œuvre, d'exploitation. Les objectifs sont rattachés aux grands enjeux (ou principes) auxquels le projet est confronté. Par exemple, pour les projets d'aménagement urbain, nous avons retenu le cadre de référence issu de la Stratégie nationale de développement durable adoptée en 2003 pour la mise en œuvre des Agenda 21 et des projets territoriaux de développement durable<sup>(3)</sup>. Ce cadre est fondé sur cinq finalités qui orientent le contenu des projets et cinq éléments déterminants quant à la démarche à suivre.

Cette démarche permet d'orienter les actions des porteurs de projets et de leurs parties prenantes sur trois niveaux : l'emprise du projet à proprement parler (une ligne/un secteur), les abords immédiats (un corridor/un quartier), et le territoire impacté (un ou des bassins de vie). Les actions retenues font l'objet d'une pré-étude qui permet d'en estimer les coûts et les bénéfices par rapport à une situation de référence (ressources naturelles préservées, énergie économisée, milieux naturels restaurés et préservés, eau de pluie réutilisée, coûts de maintenance et d'entretien réduits, emplois créés, espaces de vie redynamisés...), en s'appuyant sur l'ingénierie de spécialité



## LE PROJET CŒUR DE VILLE À MEAUX

Appliquée à l'étude de programmation du projet de revitalisation du Cœur de ville de Meaux, Tendem Empreinte® a mis en évidence, pour chaque enjeu développement durable, les actions possibles sur le terrain.

« Les élus ont apprécié qu'il y ait une vraie démarche scientifique et pas que du discours. Meaux a adhéré avec enthousiasme à cette démarche pertinente et innovante qui s'articule avec l'Agenda 21 actuellement en cours de constitution », souligne Philippe Leterme, directeur de l'urbanisme.

d'Egis qui couvre un large ensemble de domaines techniques (acoustique, biodiversité, déchets, énergie, hydraulique, mobilité, paysage, socio-économie...). Dans la démarche Tendem Empreinte®, les objectifs et les cibles sont choisis et libellés en fonction du contexte de l'opération et de la situation du projet. Plusieurs indicateurs et paramètres de mesures sont rattachés à un objectif donné. Une fonctionnalité de Tendem Empreinte® permet de générer automatiquement un rapport selon la grille d'analyse du CBDD®.

À ce jour, Tendem Empreinte® est appliqué à une cinquantaine d'opérations d'espaces publics, d'extensions urbaines, de parcs paysagers, de routes et de transports en commun, dans le cadre de missions de maîtrise d'œuvre ou d'assistance à la maîtrise d'ouvrage. □

- (1)- **CSTB** : Centre scientifique et technique du bâtiment.
- (2)- **AITF** : Association des ingénieurs territoriaux de France.
- (3)- <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Cadre-de-reference-pour-les.html>



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

## CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Association agréée par arrêté ministériel du 6 avril 1937 - Déclarée en Préfecture sous le n° 174 662

**Au 31/12/2009, la CNETP :**

. **regroupe 7 168 entreprises adhérentes,**

. **a réglé 6 626 739 jours de congés à 275 570 salariés au titre de l'exercice congés 2009,**

**Pour la 64<sup>ème</sup> campagne (01/04/2009 au 31/03/2010), en cours, la CNETP a indemnisé 2 139 193 heures d'intempéries correspondant à 57 720 déclarations d'arrêts.**

Pour contacter la CNETP :

. **Par courrier :**

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

. **Par Internet :** [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr)

- pour les entreprises : un espace de travail sécurisé
- pour les salariés : un espace personnalisé d'information

. **Par e-mail :** [contact@cnetp.fr](mailto:contact@cnetp.fr)

. **Par téléphone :**

- pour les entreprises : 01.70.38.07.70
- pour les salariés : 01.70.38.07.77

. **Serveur vocal (24h/24) :** 01.70.38.09.00

. **Par fax :** 01.70.38.08.00



# LACHAUX PAYSAGE

## « DESSINE-MOI UN ARBRE »

REPORTAGE DE PHILIPPE DONNAES

RECONNUE POUR LA QUALITÉ DE SES PRESTATIONS ET LE SAVOIR-FAIRE DE SES SALARIÉS, LA FILIALE SPÉCIALISÉE DE RAZEL EST UN VÉRITABLE « ARTISAN DU PAYSAGE » CAPABLE DE RÉPONDRE À TOUS LES PROJETS EN MATIÈRE DE CRÉATION OU D'ENTRETIEN D'ENVIRONNEMENT PAYSAGER, DE L'AMÉNAGEMENT DE ZAC À LA RÉALISATION DE JARDINS DU DOMAINE PUBLIC OU PRIVÉ.

Créée en 1984, l'entreprise Lachaux Paysage a rejoint le groupe Razel six ans plus tard en s'imposant, depuis, comme une référence de premier plan en termes d'aménagement paysager. Synonyme de qualité et de professionnalisme, elle est capable de décliner, à partir de son cœur de métier, toute la gamme de prestations en matière de création ou de restauration de l'environnement paysager : conception et aménagement, entretien d'espaces verts, plantations et restructurations d'arbres.

### TROIS AXES D'INTERVENTION

Dans la pratique, « notre activité est découpée en trois secteurs », explique

Thierry Guignard, le Directeur Général Adjoint. « Le nord et le sud de la région parisienne, confié chacun à un chef de secteur, sur lesquels nous réalisons l'entretien et la création d'espaces paysagers, et une activité bois qui regroupe toutes les opérations d'abatage, d'élagage et de valorisation des déchets ». Quant aux clients, ce sont aujourd'hui à 80 % des villes et des collectivités territoriales (départements, conseils généraux, agglomérations de communes, grandes administrations) ou des organismes para public (Aéroport de Paris, SAEM), mais également des sociétés privées. « Nous sommes également amenés à travailler sur de grands chantiers, dans le cadre de travaux de sous-traitance réalisés pour

**1- Parc de Saint-Cloud, sécurisation des arbres, Hauts-de-Seine (92).**

**2- Plantation dans un jardin privé, Paris 8<sup>e</sup>.**

**3- Aménagement paysager de l'île Seguin, Boulogne, Hauts-de-Seine (92).**

**4- Couverture A3, solarium, Bagnolet, Seine-Saint-Denis (93).**

le compte d'entreprises d'envergure nationale du BTP », commente Thierry Guignard. Grâce aux possibilités de synergies développées avec les différentes composantes du Groupe Fayat, Lachaux Paysage est en mesure d'intervenir sur des chantiers importants, pour des marchés supérieurs à 4 millions d'euros.

À titre d'exemple, « nous avons exécuté la couverture de l'autoroute A86 en Seine-Saint-Denis », un chantier de 6 millions d'euros qui a nécessité la mise en œuvre d'une démarche méthodologique de qualité, de planification et d'organisation des tâches, « et nous venons de terminer l'aménagement des jardins de l'île Seguin, conçu par Michel Desvignes ». ▶

PHOTOS 1 A 4 © DR





5



QUESTIONS À  
**THIERRY GUIGNARD**  
DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT

**Quels sont les principaux atouts de Lachaux Paysage ?**

Nous sommes une des dix structures capables de répondre à des appels d'offre importants sur l'Île-de-France, puisque plus de 97 % des 8 000 sociétés que dénombre le secteur de l'aménagement paysager francilien sont des mono entreprises qui interviennent uniquement sur des petits chantiers d'aide aux particuliers. Nous sommes membre de l'UNEP (Union des Entreprises du Paysage), et membre de l'association Sequoia qui est organisée autour d'une charte de qualité exigeante.

**Quel est votre périmètre d'action ?**

Nous intervenons quasi uniquement sur la région parisienne, sauf pour des opérations ponctuelles qui peuvent être apportées par le groupe ou qui rentrent dans la stratégie de l'entreprise.

**À ce titre, votre statut de filiale de Razel et, plus généralement, l'appartenance au groupe Fayat constitue-t-ils un avantage ?**

Bien entendu, le fait de pouvoir s'adosser à des entreprises de carrure nationale et internationale ouvre des opportunités. Nous pouvons répondre sur des projets de grande importance, pour des marchés supérieurs à 4 millions d'euros, nécessitant parfois des compétences particulières en matière de génie civil, électricité ou construction métallique. Inversement, notre savoir-faire peut être un atout supplémentaire pour le groupe sur certains chantiers, à l'instar de celui de la station d'épuration d'Olainville (91), réalisée par Razel, sur lequel nous avons effectué toute la partie d'aménagement paysager, soit 2 ha de plantations. Ce statut particulier nous permet enfin de pouvoir maintenir un niveau d'investissement annuel d'environ 400 000 euros afin de renouveler régulièrement notre parc matériel dont la valeur représente 3,5 millions d'euros.

**5- Parc des Batignolles, Paris 17<sup>e</sup>.**

**6- Création du jardin du musée Jean Cocteau, Milly-la-Forêt, Essonne (91).**

L'actualité, ce sont trois lots du tramway francilien qui ont été confiés à Lachaux Paysage : le T1, au nord de Gennevilliers, le T6 entre la porte de Charenton et Vélizy, ainsi que le T3 sur le boulevard des Maréchaux.

**L'ÉCOLOGIE EN LEITMOTIV**

Si, historiquement parlant, Lachaux Paysage n'a pas eu l'habitude d'asseoir son chiffre d'affaire sur le volet entretien des espaces verts, « puisque cette activité ne représente aujourd'hui que 20 % de nos résultats, nous avons la volonté de pénétrer ce marché qui garantit une



6



revenant jusqu'à l'emploi de chevaux de trait ! « Il va sans dire que nous ne disposons ni d'écurie ni de palefrenier », souligne avec humour Thierry Guignard, « mais nous pouvons faire appel à des associations spécialisées à même de fournir ce type d'équipement ainsi que le personnel qualifié ». Côté stratégie et préoccupations environnementales, Lachaux Paysage n'a pas attendu la loi de juillet 1992 qui, rappelons-le, impose le réemploi, le recyclage ou toutes autres actions visant à transformer les déchets végétaux en matériaux réutilisables, puisque tout le bois issu des interventions d'élagage ou d'abattage d'arbres sont valorisés depuis plusieurs années à travers un circuit spécifique (voir encadré) propre l'entreprise.

#### UN PERSONNEL HAUTEMENT QUALIFIÉ

Pour ce faire, elle s'est dotée, depuis plusieurs années, de matériels spécialisés qui lui permettent d'accomplir « noblement » l'ensemble des tâches de nettoyage : essoucheuse tractée, équipée pour le carottage des souches et pour le broyage, mini pelle hydraulique de 5 t, adaptée aux terrains difficiles et dotée d'un outil de déchiquetage des souches, broyeur de grumes Eurec Z 85 c muni de chenilles pour l'accessibilité des chantiers délicats. L'essentiel des machines fonctionne à l'électricité, afin de limiter les pollutions des moteurs thermiques, et « nous sommes aussi équipés d'outils spécifiques permettant d'effectuer des désherbages à la vapeur d'eau », précise Thierry Guignard. Technique qui présente l'avantage de limiter les

pérennité accrue de l'activité », poursuit Thierry Guignard. Pour ce faire, l'entreprise est capable de répondre aux nouvelles préoccupations environnementales en matière d'entretien, de nombreux maîtres d'ouvrage préférant, aujourd'hui, réaliser des opérations de coupes moins fréquentes, afin de suivre le cycle des saisons et des migrations d'oiseaux, tout en permettant aux sols de se régénérer plus tranquillement. « Nous pouvons même assurer des tonnes écologiques, comme les cahiers des charges le préconisent parfois », c'est-à-dire bannir tout matériel industriel en

## VALORISATION DES DÉCHETS BOIS

**Le mulch, ou paillage, est un procédé simple qui permet de valoriser les déchets verts issus des campagnes d'élagage ou d'abattage d'arbres. Pour ce faire, Lachaux Paysage dispose de matériels spécifiques capables de broyer ces résidus de bois qui sont ainsi transformés en matériaux défibrés proposés en trois granulométries : 50, 70 ou 100 mm. L'entreprise produit annuellement environ 40 000 m<sup>3</sup> de broyat, volume qui représente environ 10 000 arbres. Le matériau végétal obtenu est ensuite employé pour recouvrir les sols, cette technique permettant de protéger certains végétaux du froid, de limiter l'évaporation d'eau, donc les arrosages, ainsi que la pousse des mauvaises herbes, soit une réduction sensible au niveau de l'emploi des herbicides et autres composés phytosanitaires. Le paillage produit est employé en tant que « mulch paysager » ou paillage horticole au pied des plantations, mais aussi en « mulch viticole » en Champagne ou comme bois énergie.**

## LACHAUX PAYSAGE EN BREF

**CRÉATION : 1984.**

**EFFECTIFS : 110 personnes, dont 80 en exploitation.**

**CHIFFRE D'AFFAIRES : 13 millions d'euros en 2009, 3 à 4 % étant réinvestis chaque année pour l'achat de matériels neufs.**

**IMPLANTATION : Siège social à Villevaudé (77) et agence à Saclay (91). L'entreprise intervient principalement en Île-de-France, à 80 %, le plus souvent pour des projets publics mais également pour des clients privés.**

**7- Aménagement paysager du mail Bréchet, Paris 17<sup>e</sup>.**

**8- Aménagement paysager du SAN Val Maubuée, Seine-et-Marne (77).**

consommations d'eau, d'éliminer toute nuisance envers les riverains et d'éviter l'emploi de produits phytosanitaires polluants. Côté ressources humaines, l'entreprise s'appuie sur un personnel hautement qualifié et un bureau d'études interne, tous les ingénieurs travaux étant issus d'écoles spécialisées : INH (Institut National Horticole) d'Angers ou ITIAPÉ de Lille. □



7



8

PHOTOS A & DR

# UN ÉCO-COMPARATEUR ET UN OPTIMISEUR DE LA FURTIVITÉ DES CHANTIERS : OPTRA

AUTEUR : JEAN-MARC MORIN, CONSULTANT, EGIS MOBILITÉ

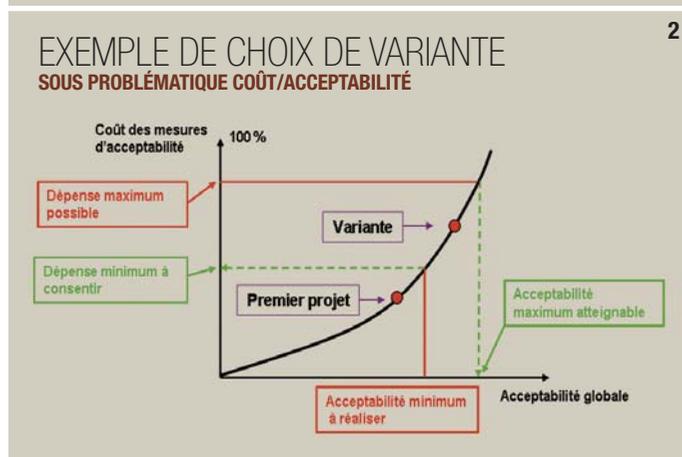
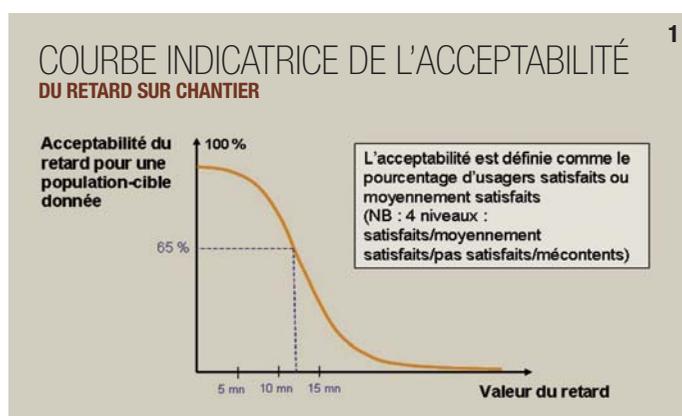
LE PROJET COLLABORATIF PROPICE – CHANTIERS FURTIFS, CO-FINANÇÉ PAR L'ANR (AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE), PILOTÉ PAR EGIS ET RASSEMBLANT PLUSIEURS PARTENAIRES, A ÉTUDIÉ EN PROFONDEUR LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES QUI CONDITIONNENT LA GÊNE PRODUITE PAR UN CHANTIER AFIN D'EN OPTIMISER LA FURTIVITÉ. PARMIS LES MÉTHODES ET MOYENS PRÉCONISÉS, LE LOGICIEL **OPTRA** (OPTIMISATION DES TRAVAUX), SPÉCIFIQUEMENT DÉVELOPPÉ DANS LE CADRE DE CE PROJET, SE PRÉSENTE COMME UN VÉRITABLE ÉCO-COMPARATEUR ET UN OPTIMISEUR DE LA FURTIVITÉ DES CHANTIERS.

On estime que les coûts externes de la congestion due aux travaux routiers en France (environ 20 % de la congestion routière totale) s'élevaient à 0,2 % du PIB, soit environ 4 milliards d'euros par an, dont 20 % sont des coûts environnementaux.

Le projet collaboratif PROPICE – Chantiers furtifs, co-financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), piloté par Egis et rassemblant des partenaires constructeurs d'infrastructures et universitaires, ainsi que des instituts de recherche et un exploitant autoroutier (Bouygues, Colas, LCPC, CSTB, Université de Clermont-Ferrand et ASF) a étudié en profondeur les différents paramètres qui conditionnent la gêne produite par un chantier : durée des travaux, durabilité des chaussées, utilisation de matériaux et de matériels innovants, règles contractuelles, incitations des entreprises sous forme de bonus/malus, information des usagers, capitalisation des bonnes pratiques... Au rang des méthodes et moyens préconisés, un outil spécifique a été développé, le logiciel **OPTRA** (Optimisation des TRAVAUX), qui se présente comme un véritable éco-comparateur et un optimiseur de la furtivité des chantiers.

## LA FURTIVITÉ D'UN CHANTIER, QU'EST-CE QUE C'EST ?

Un chantier furtif est un chantier qui ne produirait aucune gêne pour les usagers. On parle cependant de degré de furtivité lorsqu'on veut classer dif-



1- Courbe indicatrice de l'acceptabilité du retard sur chantier (65 % des usagers sont satisfaits ou moyennement satisfaits lorsque l'attente est comprise entre 10 et 15 minutes).

2- Exemple de choix de variante sous problématique coût/acceptabilité (la variante permet d'atteindre un meilleur niveau d'acceptabilité dans des limites financières acceptables).

férents chantiers en termes de gêne produite sur les usagers au sens large (automobilistes, riverains, personnel d'exploitation).

On distingue globalement entre gêne objective et gêne ressentie. Cette distinction ne recouvre pas la distinction mesurable/non mesurable.

En effet, la gêne ressentie est mesurable, bien que d'une manière plus floue que pour une grandeur physique<sup>(1)</sup>. On pourra toujours la quantifier, par exemple, par le nombre de réclamations reçues par l'exploitant de l'infrastructure, ou au moyen d'un indicateur statistique décrivant la répartition des

réponses à une enquête auprès des usagers...

En revanche, la gêne objective n'est pas toujours mesurable, du moins directement. Par exemple, concernant la sur-pollution due à un chantier, le recours à des capteurs atmosphériques ne permet pas de discerner entre CO<sub>2</sub> provenant de l'activité urbaine (chauffage, industries, ...) et CO<sub>2</sub> provenant de la circulation<sup>(2)</sup>. Faute de connaître le paramètre émission de CO<sub>2</sub> pour chacun des véhicules, on recourt à la modélisation du parc automobile et à la simulation de ses émissions et de leur dispersion. Ceci présente l'avantage sur des mesures directes de raisonner avec des paramètres de contexte

**3- Prédiction de perturbations sur basculement de chaussée à l'horizon des travaux.**

**4- Optimisation de furtivité lorsqu'on coordonne les chantiers perturbants (effet d'écran) <sup>(11)</sup>.**

**5- Optimisation de furtivité par activation anticipative du délestage.**

contrôlés, de sorte que, sans même évoquer les considérations de praticité, ces « méthodes de laboratoire » sont probablement plus pertinentes que la mesure directe.

Il y a bien sûr une corrélation forte entre gêne ressentie et gêne objective.

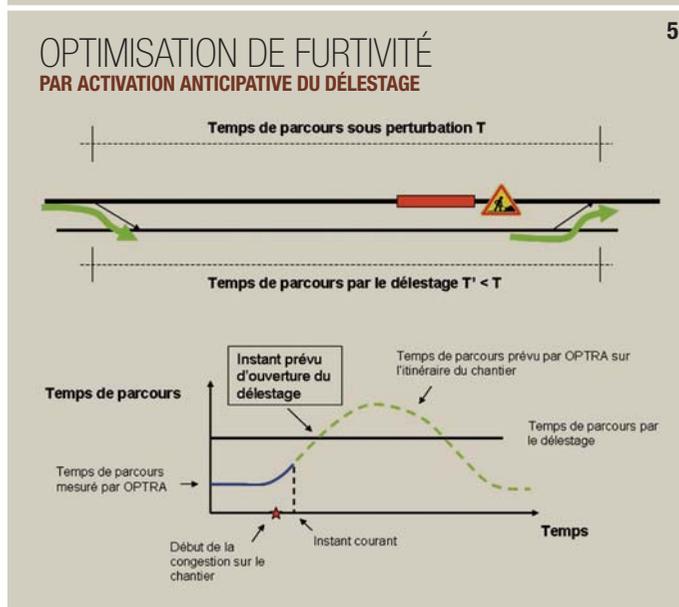
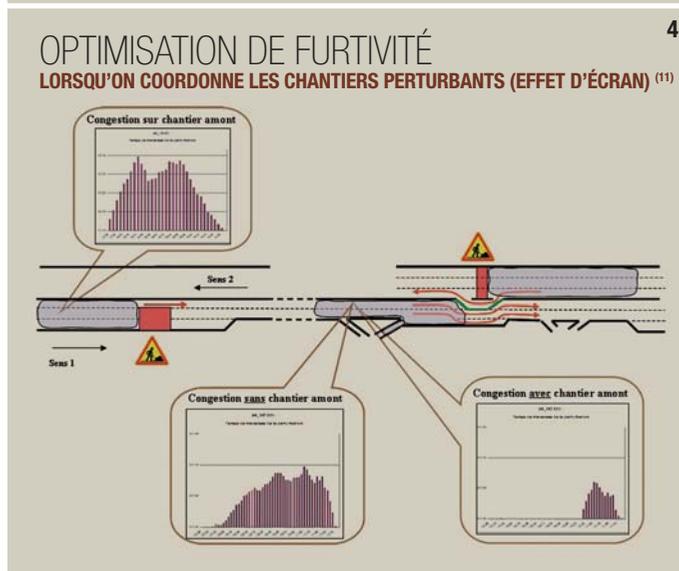
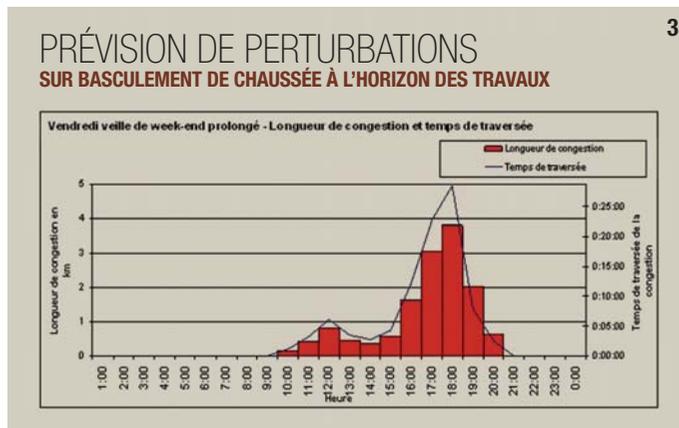
On trouve dans la littérature des exemples de mesure de telles corrélations. Il en est ainsi du rapport existant entre temps d'attente perçu dans un bouchon et temps d'attente réel, rapport d'ailleurs différent selon qu'il s'agit d'un bouchon « roulant » ou d'un bouchon avec arrêts-démarrages.

Il y a d'autre part une relation directe entre la furtivité d'un chantier définie comme plus haut et l'empreinte environnementale de ce chantier. En général, plus le chantier sera furtif, plus son empreinte sera faible <sup>(9)</sup>.

### OPTRA ET L'INDICATEUR D'ACCEPTABILITÉ

Un exploitant d'infrastructures est généralement confronté à deux impératifs contradictoires : réaliser une maintenance suffisante de son réseau afin de garantir un niveau de service de fond convenable pour ses usagers, et sauvegarder un niveau de gêne ressentie maîtrisé <sup>(4)</sup>.

S'agissant de gêne ressentie, corrélée non seulement à la gêne objective mais à d'autres paramètres (par exemple, mais pas seulement, l'information des usagers), on conçoit qu'il existe là un « degré de liberté » utilisable par l'exploitant, mais dans certaines limites <sup>(6)</sup>. De nombreuses études montrent en effet que l'attente ressentie, dans les diverses circonstances où elle est vécue quotidiennement, est d'autant plus faible qu'elle est compréhensible et prédictible. S'agissant de l'attente sur chantier, les déterminants mis en évidence comprennent le retard, la pertinence des travaux, leur fréquence,



la présence ou non d'une information et sa pertinence, la gêne introduite par les délestages éventuels (sentiment d'inconnu <sup>(6)</sup>, surcôt de temps, de péage, de distance, ...), etc. L'indicateur d'acceptabilité est conçu comme une mesure intégrée de la gêne ressentie dans tous ses paramètres, mesure qu'il

convient de comparer à divers seuils de sensibilité. La maîtrise de la gêne ressentie sur des travaux donnés passe donc en premier lieu par la baisse de la gêne objective (programmation optimale, exploitation temps réel optimisée) et en second lieu par la diffusion d'information sur cette gêne <sup>(7)</sup>.

Cependant, on ne peut pas considérer qu'une fois un chantier terminé, l'utilisateur se retrouve comme un sujet vierge de tout souvenir et prêt à affronter la gêne d'un chantier nouveau avec une susceptibilité inchangée à ce type de perturbation. D'autre part, il doit exister une notion de quantité cumulée de gêne au-delà de laquelle l'image de l'exploitant se dégrade fortement dans la population des usagers. Une gestion raisonnée de la politique de travaux supposerait donc que l'exploitant dispose d'outils de mesure et de suivi de la gêne, avec la notion de réserve de gêne cumulée (si cette notion est avérée, ce qui est un sujet d'investigation en soi) pour optimiser, sur une période donnée, les travaux à venir en fonction des travaux passés et préserver ainsi son image auprès de ses usagers <sup>(8)</sup>. Des travaux sont en cours pour développer un indicateur de gêne sur chantier adapté à cette problématique, auquel OPTRA pourra fournir la contribution « gêne sur retard » dans ses composantes de suivi (évaluation de la gêne subie sur travaux passés) et de prévision (programmation des travaux). On envisage ainsi d'intégrer dans l'outil le calcul de la gêne attachée à un chantier (niveau tactique de la programmation) et celui de la gêne cumulée sur le réseau (niveau stratégique). Les figures 1 et 2 illustrent les propos précédents.

### QUELLE EST LA PROBLÉMATIQUE ATTACHÉE À L'OPTIMISATION DE LA DÉFINITION DES TRAVAUX ?

Plusieurs stades de définition des travaux se présentent selon le type d'acteur ou la phase impliqués :

#### La conception des travaux (phasage)

Ici sont concernés le maître d'ouvrage ou le bureau d'études qui l'assiste, d'une part, et les entreprises soumissionnaires, d'autre part. L'objectif est de réaliser les travaux au moindre prix, avec la qualité convenable et dans des conditions de durabilité optimales. Il s'agit de définir le découpage géométrique et temporel optimal des travaux en phases (voies neutralisées, basculements, chaussées et ouvrages provisoires, ...). La composante d'impact sur le trafic intervient au titre de la minimisation des surconsommations et des sur-pollutions (GES, polluants chimiques et particulaires). Un outil permettant de simuler cet impact et de le minimiser est essentiel à ce stade, comme est essentielle la prévision de la demande qui va s'exercer sur le chantier à l'horizon concerné.

La maîtrise de ces deux éléments pourra faire apparaître, par exemple, la faisabilité de travaux de jour, ce qui intéresse le maître d'ouvrage dans la définition de son cahier des charges, ou l'entreprise soumissionnaire pour la proposition de variantes<sup>(9)</sup>. En effet, on sait que les travaux de jour sont moins onéreux et de meilleure qualité que les travaux de nuit.

Egis Mobilité a ainsi utilisé OPTRA pour promouvoir ce type de solutions dans le cadre d'appels d'offres, comme le présente la figure 3 qui montre que des perturbations sont à attendre dès 10 heures du matin les vendredis veilles de fêtes à l'horizon des travaux prévus.

**La programmation (optimisation de la fenêtre temporelle)**

À ce niveau, c'est l'exploitant qui est concerné : le phasage des travaux ayant été établi, il s'agit de définir de façon plus précise, à partir de prévisions de trafic souvent plus fines, les instants de début et de fin des travaux qui minimisent l'impact global sur la circulation.

Les fonctions de simulation et d'optimisation d'OPTRA sont alors mises à profit<sup>(10)</sup>. Ces fonctions permettent de simuler des groupes de chantiers et de mettre en évidence tout l'intérêt qu'il y a à programmer certains chantiers ensemble pour profiter de l'effet d'écran du chantier amont qui diminue ou supprime la congestion sur le chantier aval. La figure 4 illustre ce principe.

**L'exploitation en temps réel**

Il s'agit là d'offrir une information sur les temps de traversée de la congestion à diffuser aux usagers et, le cas échéant, de gérer de manière optimale, grâce à la prévision d'évolution de la congestion, l'ouverture et la fermeture des itinéraires de délestage.

Cette fonction d'OPTRA est en cours de développement. La figure 5 représente la logique de ce type d'application qui permet d'indiquer un itinéraire alternatif toujours plus rapide que l'itinéraire traversant le chantier perturbant, en début comme en fin d'événement, grâce à la prévision du temps de parcours.

**QUELLES SONT LES FONCTIONS D'OPTRA ?**

L'outil, basé sur la méthode de stock, possède plusieurs fonctions :

- L'aide à la programmation des chantiers, à travers deux possibilités :
  - simuler la période de travaux choisie pour connaître son impact (aide également à la définition du phasage),

**TABLEAU DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE CALCUL**

**Paramètres**

**Définition des Répertoires**

Scénarios: [F:\action - C1 (opt) - Outils\Bases\Engagement]  
Configuration: [F:\action - C1 (opt) - Outils\Bases\Engagement]  
Historique: [F:\action - C1 (opt) - Outils\Bases\Engagement]

**Paramètres trafic généraux**

Coefficient de croissance annuelle (en %) : 3.5 %  
Durée d'une tranche de calcul (Par) : 6 Minutes  
Gran d'optimisation : 30 Minutes  
Taux de PL par défaut (en %) : 10 %  
Unité : UVP  
Coefficient d'équivalence PL/VL - 1PL = 3 VL

**Capacité résiduelle**

**Capacité - chantier simple :**

Sur neutralisation voie de droite : 1900 /heure/voie  
Sur neutralisation voie de gauche : 2000 /heure/voie  
Sur neutralisation 2 voies : 1500 /heure/voie

**Capacité - chantier avec basculement :**

Capacité - Voie extrant droit : 1600 /heure/voie  
Capacité - Voie basculée : 1250 /heure/voie

**Coefficients sur capacité**

**Coefficient selon la largeur de la voie :**

Largeur de voie < 3m : 0.95  
Largeur de voie [3 m ; 3m20[ : 0.975  
Largeur de voie >= 3m20 : 1

**Coefficient selon la rampe :**

Plat : 1  
Montée [0% ; 3%[ : 0.9  
Montée >= 3% : 0.8  
Descente (< 0%) : 0.95

**Coefficient débit de retour :** 0.7

Annuler Valider

**ÉCRAN DE SAISIE D'UN CHANTIER**

**Saisie d'un chantier - étape 3/3 : Etat des voies**

Identification

Nom du scénario : Scénario 1  
Nom du groupe de chantiers : Groupe 1  
Nom du chantier : A8\_197.8S1

**Etat des voies**

Sens 1: BAU V1 V2 V3 V4 V5  
Sens 2: V5 V4 V3 V2 V1 BAU

Largeur des voies (en mètres):  
Sens 1: 2.9 3.00 3.50 3.0 0 0  
Sens 2: 0 0 0 0 0 0

Calcul automatique des capacités résiduelles par voie

Capacité résiduelle (en véh./heure):  
Sens 1: 1520 1560 1250 1220 0 0  
Sens 2: 0 0 0 0 0 0

Annuler chantier Annuler scénario Chantier suivant Calcul

**ÉVOLUTION DES LONGUEURS DE RETENUE ET DES TEMPS DE TRAVERSÉE**

**Fin du scénario : Résultats**

Indicateurs par sous-chaîtier :

HEP	Veh	Essence (l)	Gazole (l)	HC (kg)	CO (kg)	NOx (kg)	Particules (kg)	CO2 (kg)	Coût Essence
491,181	1226,127	294,762	4,016,123	3,499	16,149	1,528	1,528	14 123,087	287,62 €
402,568	607,516	290,382	5,041,680	4,289	22,830	2,156	2,156	18 198,110	337,67 €
1,093,749	1,833,643	1,345,093	10,717,603	7,788	38,979	3,684	3,684	32,321,197	625,29 €

**Fin du scénario : Résultats**

Indicateurs par sous-chaîtier :

Particules (kg)	CO2 (kg)	Coût Essence	Coût Gazole	Coût HC	Coût CO	Coût NOx	Coût Particules	Coût CO2
1,528	14 123,087	287,62 €	2 338,06 €	12,25 €	4,81 €	2,14 €	132,94 €	423,69 €
2,156	18 198,110	337,67 €	3 020,84 €	25,01 €	4,35 €	3,25 €	197,95 €	545,94 €
3,684	32,321,197	625,29 €	3 205,90 €	29,26 €	11,16 €	5,39 €	230,89 €	969,64 €

**A8\_197.8S1 : Longueur de queue (en hrs)**

**A8\_197.8S1 : Temps de traversée de la perturbation**

6- Tableau des différents paramètres de calcul.

7- Écran de saisie d'un chantier.

8- Évolution des longueurs de retenue et des temps de traversée, bilans du volume de congestion, retards cumulés, surconsommations et surpollutions quantifiés et monétarisés.

- ou demander à l'outil de trouver automatiquement, dans une période donnée, la fenêtre temporelle qui minimise l'impact du chantier (ou d'un groupe de chantiers en maximisant la fertivité par utilisation des effets d'écran).

Cette fonction s'appuie sur des données prévues : demande prévue dans la section où le chantier sera programmé, et capacité résiduelle du chantier en fonction du nombre et de la nature des voies neutralisées et de son type (simple ou à basculement).

→ L'évaluation ex post de l'impact réel du chantier, qui permet de suivre dans le temps le niveau de service effectif fourni à l'utilisateur. Cette fonction s'appuie sur les comptages réels à l'amont et à l'aval du chantier au moment de sa réalisation.

L'outil calcule les temps de traversée, longueurs et volumes de congestion, temps perdus totaux, consommation de carburant et émissions (CO<sub>2</sub> et polluants), et monétarise tous ces éléments à partir de valeurs tutélaires.

La version temps réel en cours de développement fournira aux usagers l'information sur les temps de traversée et permettra l'optimisation des ouvertures et fermetures d'itinéraires de délestage grâce à une prévision temps réel de la demande. Les figures 6, 7 & 8 présentent certains écrans de l'outil.

La pertinence du modèle sous-jacent à OPTRA a été évaluée sur plusieurs chantiers autoroutiers dans des conditions optimales de complétude et de précision des comptages. Les figures 9 & 10 présentent des exemples de résultats d'OPTRA sur chantiers réels.

Les applications d'OPTRA sur divers réseaux autoroutiers ont mis en évidence l'importance pour l'exploitant de disposer de données de comptage complètes et suffisamment précises, ce qui n'est pas toujours le cas. En effet, l'optimisation de la gestion du trafic

**9- Comparaison entre temps de parcours mesurés et simulés (Roye - Sanef).**

**10- Comparaison entre longueurs de retenue mesurées et simulées (Carcassonne - ASF).**

suppose des moyens adaptés à son enjeu. Cette exigence est surtout nécessaire pour la fonction évaluation de l'outil et son utilisation en temps réel (données à base 6 minutes).

En revanche, pour l'utilisation en programmation, l'outil utilise des données historiques horaires qu'il corrige et complète par des traitements adaptés, si nécessaire.

**CONCLUSION**

La furtivité concerne des acteurs divers dont les intérêts sont eux-mêmes divers : l'exploitant, l'utilisateur, l'entreprise de travaux et la collectivité. Il est clair que ces acteurs, bien qu'à des degrés divers, seront d'autant plus incités à promouvoir cette furtivité qu'ils y trouveront un intérêt financier<sup>(12)</sup>. Examinons ce point.

**Pour l'exploitant**

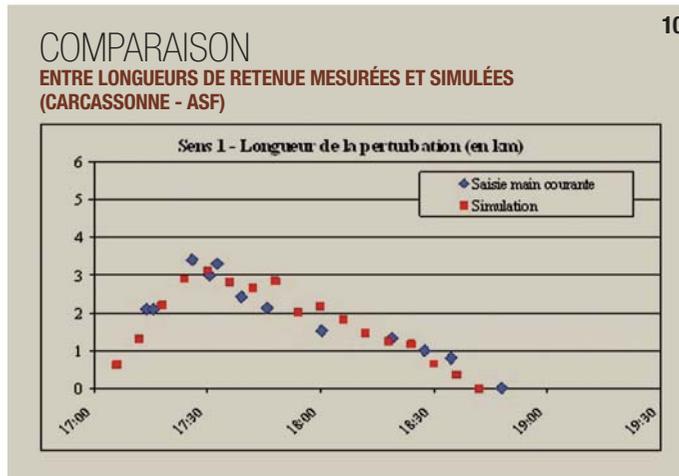
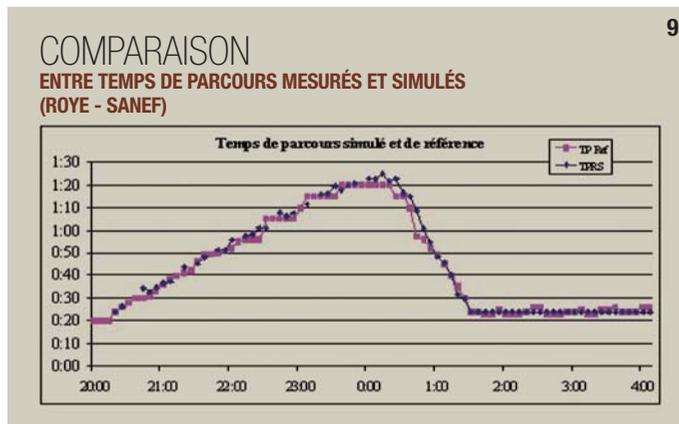
Le retour sur investissement de la furtivité est facile à identifier dans les cas où un outil comme OPTRA permet d'exécuter des travaux de jour plutôt que de nuit avec une gêne maîtrisée<sup>(13)</sup> (intérêt double : coûts des travaux diminués, maintenance future repoussée en raison de la bonne qualité d'exécution). Pour un exploitant d'ouvrage à péage, un retour direct est concevable dans la mesure où cette maîtrise de la gêne est de nature à enrayer la fuite de clientèle (une telle corrélation serait à vérifier).

**Pour l'utilisateur**

La réduction des bouchons sur travaux se traduit par une diminution de sa consommation (économie certaine), un moindre risque d'accident par baisse de l'exposition aux situations de ralentissement brusque (économie statistique) et enfin une baisse de stress (bénéfice difficilement mesurable).

**Pour l'entreprise de travaux**

En dehors d'une incitation qui se traduirait par des bénéfices concrets pour elle, c'est-à-dire le gain d'un nombre plus grand d'appels d'offre, ou par une image valorisante comme un label Furtivité (gage à terme d'une augmentation de son activité), la furtivité ne constitue pas actuellement un véritable enjeu. Elle ne le deviendra que si elle est introduite de manière significative dans les



critères d'attribution des marchés de travaux. C'est à ce niveau qu'intervient la collectivité.

**Pour la collectivité**

La logique est différente, l'approche étant multi-critères et orientée vers des bénéfices collectifs dont une partie est par nature difficilement quantifiable. Le recours à la monétarisation de la réduction des émissions de GES et de polluants, et même du temps gagné, permet d'enclencher les démarches classiques d'analyse socio-économique et s'avère précieux pour la prise de décision entre alternatives concurrentes. Cependant, comme on le verra plus loin, c'est dans sa fonction réglementaire que la puissance publique est à même d'impulser une dynamique rejoignant les intérêts palpables des acteurs de la furtivité.

En conclusion, un outil comme OPTRA apporte une contribution significative à la furtivité des travaux dans le domaine de la gêne au trafic. En effet, OPTRA permet :

→ Au maître d'ouvrage, de fixer des objectifs raisonnables de furtivité au moment où il définit les travaux, en fonction de sa connaissance du trafic. Par exemple (mais ce n'est qu'un

exemple), de fixer une durée maximum de chaque phase du chantier et de définir les niveaux de bonus en cas de réduction de ces délais (car sa solution conserve un réservoir d'optimisation) et de malus en cas de dépassement (niveau de malus justifié) ;

→ À l'entreprise, de tester des variantes et d'en apprécier les risques et les opportunités ;

→ À l'exploitant d'optimiser ses fenêtres temporelles (programmation fine) et sa gestion au jour le jour (usage en temps réel).

On voit tout l'intérêt qu'il y aurait à définir un standard d'éco-comparaison qui permette aux divers acteurs de la furtivité des chantiers d'échanger sur une base commune, objective et reconnue. Un des freins actuels est sans conteste l'absence d'une véritable prise en compte de la furtivité dans les règlements de consultation<sup>(14)</sup>. Ce point mérite une réflexion approfondie, en particulier concernant la manière de pondérer les éléments de furtivité dans les jugements des offres, et concernant les méthodes et outils utilisés pour quantifier pour chacun des acteurs ce qui apparaît, en première analyse et pour le moment, comme un élément de renchérissement des offres. □

- (1)- Une grandeur physique est de toute manière toujours connue avec une certaine incertitude.
- (2)- La notion même de référence (situation qui se serait produite si le chantier n'avait pas été fait) n'a pas d'existence dans l'absolu ; on prendra ainsi la moyenne des mesures CO<sub>2</sub> des périodes de même type hors chantier en supposant une certaine ressemblance des trafics, qui n'est toutefois pas une identité.
- (3)- Ce n'est pas toujours vrai. À furtivités égales, l'empreinte environnementale pourra être différente pour la partie qui est liée aux procédés de construction, l'insonorisation des machines... Même si on considère la seule empreinte du trafic, on montre aussi que l'effet de ralentissement qui se produit à l'intérieur du balisage (gêne aux usagers) conduit à une économie de carburant, et donc à une moindre pollution et émission de GES ; cependant, dans le cas de la gêne créée par la congestion à l'amont du chantier, ce gain s'avère tout-à-fait négligeable.
- (4)- Il est intéressant de remarquer que cela rejoint une problématique très commune qui est celle de l'opérateur économique individuel, ou du politique : une gêne actuelle pour un bienfait futur ou pour un bienfait dont le ressenti s'évanouit très vite en s'intégrant dans le niveau de service de fond (considéré comme normal).
- (5)- On trouve dans une étude académique sur la question de la gêne ressentie, cet exemple révélateur : s'avisant que la mise en place d'un panneau lumineux indiquant l'instant d'arrivée du prochain bus permettait de réduire notablement le temps ressenti, l'auteur préconise une diminution de cadence qui permettrait, à ressenti de l'utilisateur TC inchangé, de faire des économies sans doute très supérieures au coût d'installation du système dans les autobus... on ne commentera pas.
- (6)- Nettement moins fréquent, maintenant que les dispositifs de navigation embarqués se généralisent.
- (7)- Des techniques de distraction sont communément utilisées pour « faire patienter » dans les attentes de services : musiques pour les files d'attente de clients ou d'administrés... Elles n'ont pas leur place ici ; c'est essentiellement par l'information avant et pendant que l'on peut maîtriser les composantes de la gêne, comme la pertinence des travaux (avant) ou le stress devant l'inconnu (pendant).
- (8)- Par exemple, ne pas dépasser le seuil de 10 % d'utilisateurs mécontents et très mécontents.
- (9)- Dans le cas où les prévisions de trafic sont mises à disposition des soumissionnaires par le maître d'ouvrage.
- (10)- À condition que les chantiers concernés ne puissent pas être exécutés sans provoquer une perturbation, sinon un outil comme OPTRA est inutile (une simple comparaison entre demande prévue et capacité résiduelle du chantier suffit alors à identifier les périodes où le chantier ne sera pas perturbant).
- (11)- Ceci souligne au passage l'intérêt qu'il y aurait à assouplir la règle d'inter-distance minimale entre chantiers consécutifs.
- (12)- Avantages directs sans intervention étatique, ou avantages découlant de compensations financières publiques (subventions, dégrèvements, mécanismes divers...), avec les risques de mécanismes pervers qui y sont attachés.
- (13)- En offrant une maîtrise de la gêne éventuellement produite, dont on ne prendrait pas le risque tant que celui-ci n'était pas évaluable. NB : cela suppose un arbitrage entre le gain financier de l'exploitant et l'accroissement de gêne pour ses clients, question qui renvoie à une monétarisation de cette dernière composante.
- (14)- À la différence de ce qu'on peut observer dans les pays anglo-saxons.



# FAVORISER LES ÉNERGIES ALTERNATIVES EN DISTRIBUTION URBAINE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

**LE MONDE DU TRANSPORT EST CONFRONTÉ À UN DÉFI ENVIRONNEMENTAL DE TAILLE. POUR LE RELEVER, LES CONSTRUCTEURS ESTIMENT DÉSORMAIS QU'IL N'Y A PAS DE SOLUTION UNIQUE ET MIRACULEUSE MAIS DES SOLUTIONS MULTIPLES. C'EST AINSI QUE LE DERNIER IAA DE HANOVRE, SALON EMBLÉMATIQUE ET DE RÉFÉRENCE POUR LES VÉHICULES INDUSTRIELS ET LES UTILITAIRES LÉGERS A DONNÉ TOUTE LEUR VISIBILITÉ À DEUX THÈMES MAJEURS POUR LES CONSTRUCTEURS : LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE ET LES SOLUTIONS ALTERNATIVES AU « TOUT GAZOLE ».**

Les efforts de recherche des constructeurs portent aussi bien sur la réduction de la consommation des véhicules Diesel que sur le développement de solutions alternatives comme le GNV (gaz naturel pour véhicules), le tout-électrique ou l'hybride.

Le choix d'un camion propulsé par l'une ou l'autre de ces technologies se fera, pour l'utilisateur, en fonction de l'usage qu'il aura de son véhicule.

Ainsi, les constructeurs proposent-ils différentes solutions visant à fournir à leurs clients des outils à la fois efficaces, fiables et rentables et qui, dans le même temps, limitent l'impact de leur activité sur l'environnement, thème auquel les transporteurs, comme les

collectivités locales et la société dans son ensemble, sont de plus en plus attachés.

La plupart de ces véhicules sont encore au stade de l'expérimentation en vraie grandeur sur le terrain. Quelques uns d'entre eux sont déjà commercialisés et en service.

## **LA TECHNOLOGIE AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT**

Pour respecter les normes européennes « Euro » aujourd'hui en vigueur et celles à venir, les constructeurs sont appelés à faire des efforts financiers et techniques considérables. Par exemple, pour diminuer les rejets d'oxyde d'azote, ils ont quasiment tous adopté la technologie SCR (Selective Cataly

st Reduction) : le système SCR transforme les gaz d'azote nocifs en vapeur d'eau et en azote inoffensif. Il repose sur une réaction chimique connue : la catalyse. Avec cette technologie, les émissions d'oxyde d'azote sont éliminées lors du post-traitement.

Le système SCR présente un avantage majeur : il convient même dans le cas de puissances utiles élevées, puisqu'il ne nécessite ni graissage supplémentaire du moteur, ni augmentation du système de refroidissement.

La technologie SCR résiste également aux disparités du carburant ; elle peut être utilisée sur les marchés où la qualité du carburant est inférieure à celle présente au sein de l'Union Européenne. Côté consommation, les baisses

enregistrées ces dernières années résultent d'évolutions technologiques portant sur l'ensemble de la chaîne cinématique. Des progrès considérables ont vu le jour sur les boîtes de vitesses, y compris sur celles des camions de chantier : elles sont robotisées et gérées électroniquement.

Les innombrables innovations technologiques, des systèmes de traction hybrides en série et en parallèle, des moteurs au gaz naturel aux moteurs électriques, se sont aujourd'hui transformées en autant de véhicules disponibles et accessibles pour les utilisateurs. Il s'agit de projets et de produits durables, en mesure de concilier des coûts d'exploitation réduits et une grande attention pour l'environnement.

## TECHNOLOGIE HYBRIDE ET DISTRIBUTION

Tous les constructeurs poursuivent le développement de véhicules hybrides spécifiquement pour les métiers du transport et de la distribution urbaine.

La technologie hybride est en effet particulièrement adaptée au transport en ville : outre une économie certaine de la consommation en carburant grâce à l'utilisation du moteur électrique, elle diminue considérablement les nuisances sonores et les émissions de gaz polluants.

La technologie hybride associe moteurs thermique et électrique. Ceux-ci fournissent la puissance aux roues selon deux modes de répartition, soit les deux en parallèle, soit séparément.

Le principe de cette technologie est simple : l'énergie cinétique du véhicule est récupérée lors du freinage ou des phases de décélération et est transformée en électricité. Elle est stockée dans les batteries de traction qui fonctionnent de ce fait en parfaite autonomie et n'ont pas besoin d'être rechargées.

MERCEDES BENZ

### ATEGO HYBRID, CAMION DE L'ANNÉE 2011

< MATÉRIEL HYBRIDE >

Le nouvel Atego de Mercedes Benz a été élu camion de l'année 2011 dans le cadre du salon IAA, par un jury de journalistes spécialisés de 21 pays européens. Récompense qui parachève les efforts apportés par le constructeur, notamment en matière de protection de l'environnement, avec la généralisation de moteurs BlueTec sur l'ensemble de la gamme ainsi que les moteurs EEV et des solutions innovantes. En effet, l'Atego mise sur les propul-

sions alternatives avec le lancement, à l'automne 2010, de la production d'une flotte à la pointe de l'innovation composée des 50 premiers Atego BlueTec Hybrid. Selon le type de mission, la consommation et les émissions de CO<sub>2</sub> peuvent diminuer de 10 à 15 %. À l'intérieur, la cabine offre une multitude de nouveautés au niveau de l'aménagement, notamment un volant multifonction qui permet de piloter l'ordinateur de bord, le téléphone et l'autoradio. ■



L'Atego Hybrid de Mercedes Benz a été élu « camion de l'année 2011 ».

RENAULT TRUCKS

### PREMIUM HYBRIS TECH

< MATÉRIEL HYBRIDE >



Le Renault Premium Hybris Tech de Colas Rhône-Alpes Auvergne.

Renault Trucks, par exemple, propose le Premium Distribution Hybris Tech, en partenariat avec plusieurs clients.

Après SITA et le Grand Lyon, qui exploitent un véhicule BOM (benne à ordures ménagères) dans les rues de l'agglomération lyonnaise, l'entreprise Colas Rhône-Alpes - Auvergne teste actuellement un véhicule hybride.

L'objectif est d'évaluer le camion en conditions réelles et dans des applications variées. Équipé d'une benne basculante, ce véhicule est dédié à l'approvisionnement des chantiers urbains en matériaux pondéreux.

Il s'agit d'un Premium Distribution Hybris Tech 4x2 dont l'empattement a été réduit de 3 900 à 3 700 mm

pour répondre à l'attente de certains clients : le châssis étant plus court, le véhicule est plus maniable. Il bénéficie de la nouvelle motorisation thermique DXi7 Euro 5 associée à un moteur électrique de 120 kW en pic et 70 kW en continu, connecté à une batterie de traction. Située derrière la roue avant droite, elle est reliée à l'électronique de commande, aux circuits de distribution de puissance et au système de refroidissement. Ils forment le module hybride qui est connecté à la boîte de vitesses Optidriver+.

Le véhicule de Colas Rhône-Alpes Auvergne, tout comme celui de SITA - Grand Lyon dispose d'une suspension mécanique à l'avant et pneumatique à l'arrière. ■

## IVECO EUROCARGO HYBRIDE

< MATÉRIEL HYBRIDE >

Le nouvel Eurocargo hybride, disponible en versions 7,5 et 12 t de poids total en charge, est équipé d'une transmission diesel-électrique parallèle permettant d'assurer la livraison et l'enlèvement de marchandises en milieu urbain, sans renoncer aux performances à pleine vitesse, sur autoroute, avec des consommations inférieures de 30 % en milieu urbain par rapport aux véhicules équipés de moteur diesel conventionnel. La version 12 t, exposée à Hanovre, utilise un moteur Tector EEV, de 180 ch (132 kW), associé à un moto-générateur électrique de 60 ch (44 kW), à une boîte de vitesses automatisée à 6 rapports et à des batteries lithium-ion



Le nouvel Eurocargo hybride (diesel-électrique) d'Iveco.

d'une capacité nominale de 1,9 kWh. La version 7,5 t possède un moteur Tector EEV, de 160 ch (118 kW), avec boîte de vitesses, moto-générateur et

batteries, comme pour la version 12 t. Les fonctions du système prévoient le démarrage du véhicule en mode exclusivement électrique, le démarrage automatique du moteur diesel selon la demande du conducteur, l'activation complémentaire du moteur électrique en phase d'accélération et en côte, la fonction Stop&Start et un système de freinage régénératif, en phase de déclenchement et de freinage. La charge utile est réduite de seulement 200 kg par rapport aux modèles équipés de moteur diesel. Une autre innovation présente sur ce véhicule est le déclenchement automatique du frein moteur en phase de décélération, avant l'intervention du frein de service. ■

## MAN TGL 12.220 HYBRID

< MATÉRIEL HYBRIDE >



Les batteries du MAN TGL 12.220 occupent un espace réduit.

Chez MAN, la technique hybride pour les camions de distribution remonte à 1983. Elle a évolué pour aboutir

aujourd'hui au TGL 12.220 Hybrid, équipé d'un moteur diesel EEV de 220 ch, qui fournit sa puissance à un réducteur hybride.

En outre, un moteur électrique de 60 kW est intégré à la chaîne cinématique et sert d'alternateur-démarrateur. Un embrayage sépare le moteur électrique et la boîte de vitesses du moteur à combustion interne, et permet une conduite purement électrique. Le moteur électrique est également utilisé comme générateur électrique en mode alternateur et l'énergie de freinage est stockée dans une batterie compacte à ions lithium. L'ensemble du système se compose d'une boîte de vitesses automatisée à 6 rapports, d'un moteur électrique et

d'une batterie à haute tension. Il prend en charge toutes les fonctions d'un système intégralement hybride : la fonction arrêt/démarrage, la récupération de l'énergie de freinage, l'assistance à l'accélération (amplification de la puissance) et la conduite purement électrique. C'est dans le dispositif hybride de gestion de l'énergie de MAN qu'est logée la commande intelligente du système qui pilote les flux énergétiques entre le moteur diesel, le moteur électrique, l'accumulateur d'énergie, l'essieu moteur et les organes auxiliaires. ■

## DAF LF HYBRIDE FIN 2010

< MATÉRIEL HYBRIDE >

D'ici la fin de l'année, Daf lancera la production du Daf LF Hybrid, un camion de distribution de 12 tonnes doté d'un système hybride parallèle. Ce début de production vient conclure une série complète de tests sur le terrain de deux ans au cours desquels les véhicules ont été utilisés dans les applications quotidiennes les plus

diverses auprès de clients européens. L'utilisation de la technologie hybride permet de réduire la consommation de carburant, et donc les émissions de CO<sub>2</sub>, de 10 à 20 %, en fonction de l'application. DAF est l'un des premiers constructeurs de camions européens à lancer la production d'un camion hybride. ■



Daf lancera fin 2010 son premier LF hybride.

## ZÉRO ÉMISSION : DE L'HYBRIDE AU TOUT ÉLECTRIQUE

Le concept d'un véhicule industriel « zéro émission » est sur le point de se concrétiser, du moins dans les zones urbaines et les agglomérations. Le développement des propulsions alternatives progresse rapidement chez la plupart des constructeurs, notamment au sein du groupe Daimler, comme en attestent quelques uns des modèles présentés dans le cadre de l'IAA : un Atego

BlueTec Hybrid, représentant d'une première flotte innovante de 50 véhicules faisant suite au prototype, une version de série de l'Econic NGT animée par une propulsion au biogaz affichant un bilan CO<sub>2</sub> neutre, l'un des quelque 1 000 Canter Eco-Hybrid produits de série, un camion Freightliner Business Class M2e Hybrid, un Sprinter Hybrid ainsi qu'un Sprinter LGT propulsé au GPL.

### MERCEDES BENZ VITO E-CELL

< MATÉRIEL ZÉRO ÉMISSION >

La prochaine étape consiste à développer des véhicules roulant sans dégager aucune émission sur leur site d'affectation.

Les deux solutions clés sont la propulsion à pile à combustible et la propulsion électrique par batterie.

Daimler est également un précurseur dans ce domaine, comme en témoignent trois véhicules qui seront présentés

dans le cadre du Salon de Hanovre. Le Citaro FuelCell-Hybrid est déjà produit en petite série et les essais clients sont sur le point de démarrer. Une série de 100 exemplaires du nouveau Vito E-CELL est actuellement en cours de production et les tests ont déjà commencé auprès des clients. 2 000 exemplaires supplémentaires du Vito E-CELL suivront à partir de 2011. ■



Deux mille Vito E-CELL seront produits par Mercedes Benz en 2011.

### FUSO CANTER E-CELL

< MATÉRIEL ZÉRO ÉMISSION >



Le Canter E-CELL de Fuso dispose d'une autonomie de 120 km.

Le Canter E-CELL de Fuso (du groupe Daimler), constitue une étape supplémentaire après l'introduction réussie du Canter Eco-Hybrid.

Il vient de faire sa première apparition et Fuso souhaite recueillir à partir de cette étude les premiers échos de ses clients potentiels avant d'envisager une éventuelle production en série.

Caractérisé par une autonomie de 120 km, un silence de fonctionnement presque absolu et une totale absence d'émissions, le Canter E-CELL est idéal pour les livraisons en centre-ville ou les interventions dans les zones écosensibles.

Ses batteries, logées dans le cadre de châssis, sont proposées dans la technologie lithium-ion de dernière géné-

ration. Leur capacité est considérable (40 kWh) et offre une autonomie de 120 km, qui dépasse largement le kilométrage quotidien réalisé en ramassage-distribution ou par les artisans intervenant en ville.

Même pour recharger une batterie entièrement déchargée, le temps de charge à la prise d'un réseau de 380 V ne dépasse pas 6 heures environ. ■

### IVECO ECODAILY ELECTRIC

< MATÉRIEL ZÉRO ÉMISSION >

La dernière évolution de l'EcoDaily Electric d'Iveco est un véhicule à propulsion électrique, équipé de batteries de traction scellées, technologie Na/NiCl<sub>2</sub> (sodium-chlorure de nickel) – qui ne produisent aucune émission gazeuse, ne requièrent pas d'entretien et sont totalement recyclables – avec une tension nominale de 278 volts.

Le véhicule est équipé, selon les versions et l'autonomie nécessaire, de deux à quatre batteries ainsi que d'un système de freinage régénératif, qui recharge les batteries pendant le freinage, augmentant ainsi l'autonomie. Sa vitesse maximale est limitée par un dispositif électronique à 70 km/h et son autonomie est comprise entre 90 et 130 km, en fonction du nombre

de batteries et du type de mission. Le point faible qui caractérisait autrefois les véhicules électriques – à savoir le poids des batteries, qui pénalisait la charge utile – a été substantiellement éliminé par Iveco grâce à la conception et à la fabrication d'un véhicule qui pèse, à vide, avec les 2 batteries, à peine 300 kg de plus que l'équivalent Diesel. ■



L'EcoDaily Electric pèse à peine 300 kg de plus que son équivalent Diesel.

## GNV : NI FUMÉES, NI PARTICULES

Certains constructeurs, comme Volvo, considèrent le gaz naturel pour véhicules (GNV) comme l'alternative la plus viable au pétrole comme carburant pour les moteurs Diesel. Son principal intérêt est d'offrir un potentiel considérable en tant

que passerelle vers une meilleure utilisation des biogaz non polluants. Plusieurs réalisations sont déjà en expérimentation sur le terrain ou commercialisées depuis peu.

### VOLVO MÉTHANE-DIESEL ET BIO-DME

< MATÉRIEL GNV >

En 2010, Volvo Trucks a conduit des tests en conditions réelles avec des moteurs au méthane-diesel avec 70 % de gaz dans le carburant. Le reste étant un mélange de diesel « bio », c'est-à-dire un mélange de diesel fossile et de diesel « vert » produit à partir de matières premières renouvelables.

Le but est de rouler avec un carburant composé de 80 % de biogaz écologique et 20 % de biodiesel, afin d'obtenir 80 % moins d'émissions de dioxyde de carbone qu'avec un Diesel traditionnel.

Parallèlement, Volvo Trucks est le premier constructeur au monde à utiliser



Une BOM Volvo hybride est expérimentée en France par Veolia.

du bio-DME (diméthyléther) comme carburant pour véhicule. Avec l'inauguration récente par la compagnie pétrolière Preem d'une station-service DME à Stockholm, les cinq premiers

camions de Volvo fonctionnant au DME vont désormais pouvoir circuler sur les routes de Suède.

Le bio-DME est un biocarburant extrêmement intéressant car ses émissions

de dioxyde de carbone sont 95 % plus faibles que celles du gazole.

La participation de Volvo Trucks à ce projet se traduit par la mise à disposition de camions FH qui seront testés par un panel de clients sélectionnés dans différentes villes suédoises.

À l'IAA, Volvo a également présenté un système hybride intégrant un moteur de 7 litres qui équipera prochainement une version hybride du Volvo FE dont le lancement est prévu pour 2011.

À l'heure actuelle, le système hybride et la technologie associant le gaz méthane et le diesel sont tous deux testés par divers clients dans toute l'Europe. ■

### RENAULT TRUCKS PREMIUM DISTRIBUTION GNV

< MATÉRIEL GNV >

De son côté, Renault Trucks propose le Premium Distribution fonctionnant au GNV.

Cette énergie offre des avantages considérables pour l'environnement puisque les véhicules ainsi équipés ne dégagent ni fumées, ni particules. En outre, les gaz d'échappement qu'ils

émettent sont pratiquement inodores. De plus, un véhicule GNV est moins bruyant qu'un véhicule thermique, ce qui en fait un atout pour des usages urbains et principalement pour les collectivités territoriales recherchant des solutions alternatives au diesel, fiables et performantes. ■



Le Premium Distribution GNV de Renault Trucks évoluant en site urbain.

### SCANIA MOTEURS À GAZ POUR LA DISTRIBUTION

< MATÉRIEL GNV >

Enfin, Scania achève le développement d'une nouvelle génération de moteurs fonctionnant au biogaz aussi bien qu'au gaz naturel et affichant des caractéristiques similaires à celles des moteurs diesel. Ils sont adaptés à la distribution, à la

collecte des déchets, aux bus urbains avec un large choix de configuration pour chaque cas.

Développés en interne, les nouveaux moteurs à gaz Scania de 270 et 305 ch sont aujourd'hui fin prêts pour leur commercialisation.

Ainsi, à peine refermées les portes du salon de Hanovre, tous les intervenants sont déjà au travail pour apporter plus encore et dès demain des réponses pratiques aux problèmes d'énergie et de protection de l'environnement dans le secteur des transports. ■



Scania va lancer fin 2010 une nouvelle génération de moteurs au biogaz.



© G. HALARY/SAEM VAL DE SEINE AMÉNAGEMENT

# VILLE DURABLE : LE PROGRÈS PASSE PAR LA MESURE

AUTEURS : CHRISTOPHE GOBIN, COORDINATEUR R & D, VINCI CONSTRUCTION FRANCE - GÉRALDINE THOMAS-VALLEJO, RESPONSABLE ENVIRONNEMENT ET SCIENTIFIQUE, VINCI

IL Y A UN AN, LE PRÉCÉDENT NUMÉRO DE LA REVUE TRAVAUX DÉDIÉ À LA VILLE DURABLE PRÉSENTAIT LE LANCEMENT D'UN EFFORT DE RECHERCHE DANS LE CADRE DE LA CHAIRE PARISTECH « ECOCONCEPTION DES ENSEMBLES BÂTIS ET DES INFRASTRUCTURES ». IL S'AGISSAIT NOTAMMENT D'APPRÉHENDER LA VILLE DANS SON ENSEMBLE ET DE MESURER SON IMPACT ENVIRONNEMENTAL PAR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE. L'OBJECTIF EST DE DISPOSER, À L'ÉCHÉANCE D'UN TRAVAIL COLLABORATIF ENTRE CHERCHEURS ET OPÉRATIONNELS, D'OUTILS AUTORISANT UNE MÉTRIQUE SIGNIFICATIVE ET DISPONIBLES POUR TOUTES LES PARTIES PRENANTES DE LA CONSTRUCTION. NOUS FAISONS ICI ÉTAT DES PREMIERS RÉSULTATS, QUI GAGNERONT EN CRÉDIBILITÉ SI S'INSTAURE, DANS LA COMMUNAUTÉ DES PROFESSIONNELS, LE NÉCESSAIRE DÉBAT AUTOUR DE LA QUESTION ESSENTIELLE DE LA MESURE.

1- Même en zone dense dans des villes historiques, il existe de la place pour des quartiers nouveaux, comme l'île Seguin (Boulogne, Hauts-de-Seine). Comment évaluer leurs aspects « durables » ?

2- Étude d'un modèle morphologique d'un quartier à partir d'un retour d'expérience du quartier Vauban de Fribourg.

3- Présentation générale de l'évolution environnementale du quartier.

1- Even in dense areas of historic cities, there is room for new districts, such as Ile Seguin (Boulogne, Hauts-de-Seine). How can their «sustainable» aspects be assessed?

2- Design of a morphological model of a district based on experience feedback from the Vauban district in Freiburg.

3- General overview of environmental assessment of the district.



### MULTIPLICITÉ DES RÉFÉRENTIELS

Depuis peu, la moitié des habitants de cette planète vit en ville. C'est déjà le cas pour 80 % des Européens.

Il est plus qu'urgent de revisiter notre compréhension de la ville, de son fonctionnement, de son économie, en y intégrant les enjeux environnementaux de cycles de vie de ces territoires particuliers.

S'il faut reconnaître qu'un certain nombre de pays et quelques entreprises du BTP ont déjà abordé l'analyse du cycle de vie des ouvrages, en particulier pour les bâtiments, la question est maintenant posée pour ce qui concerne la ville. Les référentiels utilisés depuis plusieurs années pour les bâtiments étendent leurs travaux à l'évaluation des quartiers : référentiel écoquartier

LEED, BREEAM Communities, CASBEE Urban Development, HQE aménagement... En France, les équipes du ministère (MEEDDM) réalisent leur propre « référentiel EcoQuartiers » dans le cadre de l'appel à projets 2010.

La multiplicité de ces outils laisse les élus et leurs concitoyens perplexes lorsqu'ils souhaitent entreprendre une démarche de projet d'écoquartier, d'éco-ville ou d'écoterritoire. Le sujet se révèle en effet plus complexe qu'il n'y paraît : il s'agit d'intégrer des paramètres environnementaux sans dégrader les aspects économiques et sociaux.

Plus encore, cela impose de disposer rapidement d'une réponse qui ne relève plus de la seule initiative individuelle et dont l'usage fasse l'objet d'un vrai consensus. La nouvelle équation de

la ville durable doit ainsi prendre en compte l'éco-nomie en tant que système économique et social, l'éco-logie en tant qu'écosystème, et doit être coproduite par tous les acteurs de la cité. Il importe également de prendre en considération le métabolisme urbain et les coûts associés, en particulier aux adaptations aux changements climatiques.

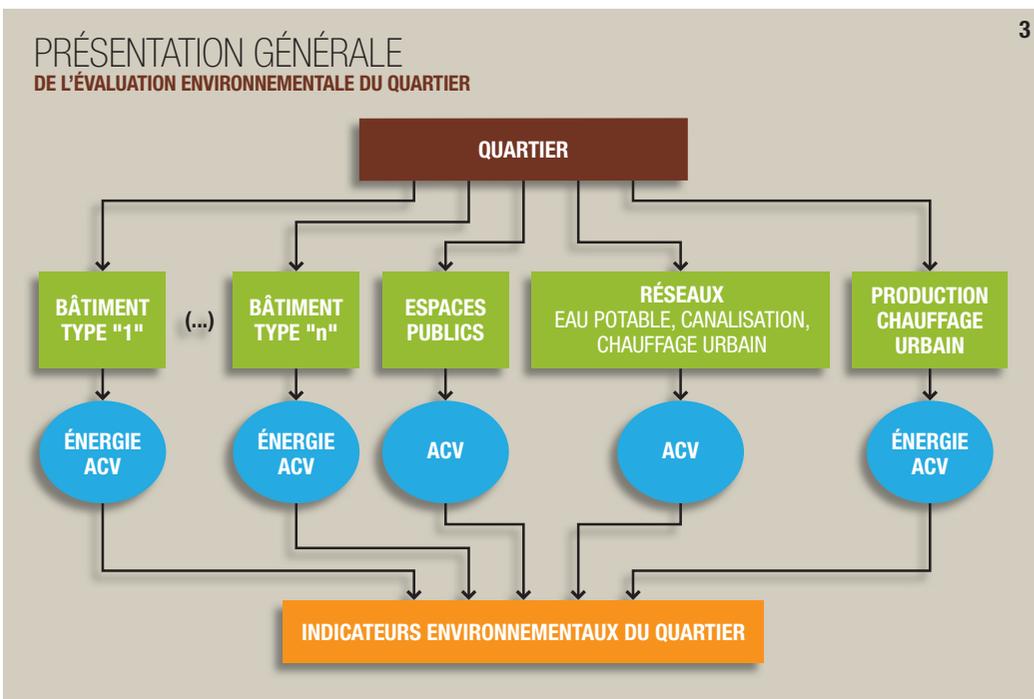
Plutôt que d'interroger ici dans le détail les différentes tentatives qui se déploient, il semble plus opératoire de se référer à l'expérience des démarches qualité. Elles nous ont appris que les progrès réellement acquis l'ont été sur la base d'une capacité à évaluer les changements. Chacun admet que, pour progresser, il faut savoir mesurer. Cependant, pour parvenir à un tel résultat dans le champ de l'urbain, il est nécessaire de réfléchir à la problématique spécifique de la ville, qui ne s'aborde pas comme la simple extension d'un bâtiment, et d'examiner les voies de réponse à ces questions.

### ÉQUATION URBAINE TYPE

Il est indispensable de mieux définir les termes de la problématique de la ville durable. Se saisir de la question urbaine n'est pas chose facile. Trop de disciplines sont nécessaires pour prétendre y apporter une réponse originale. Toutefois, le fait de retenir la dimension « mesure » peut réduire cette complexité et rendre plus accessible un résultat potentiel.

La première difficulté à envisager est celle de la variété des contextes puisqu'aucune ville, du moins en Europe, ne peut être envisagée ex nihilo. Cette remarque n'est pas seulement de pure forme, elle soulève en fait la question du traitement de l'existant. Comment définir des solutions qui puissent à la fois s'appliquer pour créer de nouveaux ensembles bâtis et pour réhabiliter, du point de vue environnemental, des quartiers et des territoires urbains ayant leur propre vécu ? Il ne s'agit pas seulement de retrouver une cohérence globale. Il faut surtout disposer des outils adéquats, ce qui suppose d'avoir réfléchi aux variations des configurations urbaines à partir d'invariants systémiques, ce que l'on pourrait appeler aussi le tronc commun, l'équation urbaine type.

C'est dans cette perspective qu'une seconde observation est devenue nécessaire. Il existe en effet une certaine confusion, peut-être entretenue par certains, entre l'idée d'écoquartier et la notion de développement durable de la ville.



Un écoquartier suppose que sa gestion minimise les impacts environnementaux du fait d'une écoconception.

Mais ce n'est pas pour cela qu'il participe à un développement durable de la ville. Une gated community est certainement une bonne chose pour ce qui concerne l'environnement du fait du soin apporté au traitement des aspects environnementaux, mais une ségrégation sociale, voire fonctionnelle, n'est pas un gage de cohésion urbaine ni de pérennité pour le moyen terme.

Un écoquartier réfléchi dans sa globalité ne peut pas se penser indépendamment d'une inscription dans une démarche d'aménagement durable.

### EMBOÎTEMENT DES ÉCHELLES

Ces remarques convergent sur le problème central des échelles. Parler d'une ville durable, c'est nécessairement traiter de la question de différents points de vue. Une ville n'est pas seulement l'addition d'une suite de bâtiments.

C'est aussi une entité qui doit être placée dans la perspective d'un développement économique plus large, ce qui conduit à raisonner à l'échelle régionale, voire mondiale. Aucune ville ne peut travailler repliée sur elle-même, elle est forcément ouverte sur l'extérieur et soumise aux sollicitations dont l'origine se situe dans un périmètre beaucoup plus vaste. Cet emboîtement

des échelles suppose une méthode de travail appropriée, qui dépasse le cloisonnement introduit par les métiers (architectes, aménageurs, urbanistes, édiles...) et assure une continuité dans la prise de décision. Cette dernière observation soulève enfin la question de l'implication des différents acteurs de la cité. Il s'agit alors d'une mise en pratique nouvelle de la responsabilité de chacun, que ce soient les citoyens, leurs représentants ou les entrepreneurs de la ville. C'est dans cet esprit que VINCI consacre d'importants efforts pour mieux inscrire ses interventions de conception-construction-exploitation dans une démarche collective partagée, indispensable pour être efficace et productive, et qui doit nécessairement s'enrichir de la complémentarité entre les différentes approches. L'architecte Henry Van de Velde ne disait-il pas que « la ville est une grande maison, et la maison une petite ville » ?

### ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Si la mesure correspond bien à une prise de responsabilité, un certain nombre de pré-requis est nécessaire pour disposer d'une méthodologie appropriée à la ville :

→ La mesure s'opère sur un projet qui doit avoir été au préalable réfléchi quant à ses finalités : quel est le programme de la ville/du quartier étudié, quels sont

les services que l'entité veut offrir à ses habitants ?

→ La mesure s'entend comme marqueur d'une différence entre un état initial et une configuration projetée que l'on souhaite atteindre et dont un progrès au plan environnemental est attendu. Par exemple, la réhabilitation d'un système de chauffage collectif pour un plus efficace, le réaménagement de voies de circulation pour favoriser les modes doux, la création d'un quartier neuf sur une friche industrielle...

→ Toute action menée sur un ensemble urbain est voué à durer plusieurs générations. La mesure relève alors d'une analyse du cycle de vie (ACV) pour tenir compte de la durée.

Désormais, l'usage d'une ACV pour évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment ou d'une route est admis, sinon acquis. En France, des outils tels que EQUER<sup>(1)</sup> ou les FDES<sup>(2)</sup> ont fait leurs preuves pour le bâtiment. L'outil SEVE<sup>(3)</sup> commence à être utilisé de manière collective pour les projets de route. Ces outils, développés pour des périmètres spécifiques au bâtiment ou à la route, devront être reconfigurés pour être appliqués à l'échelle d'un morceau de ville.

Quatre développements sont actuellement entrepris au sein de la chaire ParisTech « Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures », en partenariat avec VINCI, pour appréhender la ville dans son ensemble et mesurer son impact environnemental par l'ACV.

#### ACV-quartier

Une ACV-quartier consiste à articuler l'ACV de chacune des composantes d'un quartier, à savoir les bâtiments (par exemple, prise en compte de l'ombre portée d'un bâtiment sur un autre), les infrastructures, les espaces publics... Il n'y a donc pas de difficulté théorique particulière. Cependant, pour permettre l'utilisation de cet outil assez en amont d'un projet, se pose la question de la saisie des données. En effet, celle-ci, comprenant notamment la liste des impacts environnementaux de chacun des éléments de la ville, peut être extrêmement longue. L'objectif est de simplifier les inventaires tout en gardant des résultats significatifs. Ce travail est actuellement complété par la capacité à utiliser des scénarios différents selon le mix énergétique du quartier. Ce dernier a un impact non-négligeable, qui deviendra un paramètre de décision important du fait des variations maintenant autorisées dans les sources d'approvisionnement.



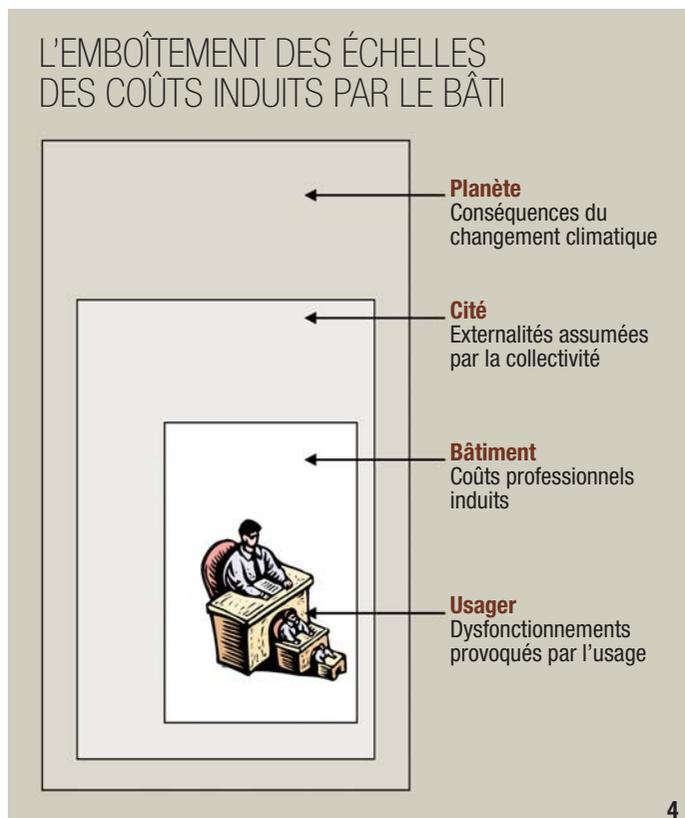
5

4- L'emboîtement des échelles des coûts induits par le bâti.

5- Vue aérienne de la Cité Descartes à Champs-sur-Marne / Marne-la-Vallée. Les outils de mesure issus des travaux de la Chaire Eco-conception ParisTech seront testés sur le projet de réaménagement de la Cité Descartes à Marne-La-Vallée en collaboration avec les Ateliers Lion, architectes urbanistes.

4- Interlinking of cost scales resulting from building stock.

5- Aerial view of Cité Descartes at Champs-sur-Marne / Marne-la-Vallée. The measuring tools resulting from the work of the ParisTech Eco-design Chair will be tested on the project for renovation of Cité Descartes in Marne-La-Vallée in cooperation with the urban architectural firm Ateliers Lion.



4



© ICONOTHEQUE EPAMARNE-EPAFRANCE / PHOTOGRAPHE : ÉRIC MORENCY, 2007

### ACV-réhabilitation

Une ACV-réhabilitation introduit la possibilité de partir d'un état existant et d'évaluer l'avantage d'introduire de nouvelles solutions techniques qui améliorent les performances de fonctionnement. La difficulté théorique est celle de la réduction du modèle. Comment obtenir une modélisation réaliste sans disposer de toutes les données ? La question ne relève pas uniquement d'un souci de rapidité, mais surtout de l'incapacité à accéder à un diagnostic détaillé du bâti (conditions de vieillissement, nature exacte des matériaux...). Cette substitution

nécessité par un manque de traçabilité est en voie de résolution, et elle est confortée par des échanges entre laboratoires européens.

### ACV-mobilité

Une ACV-mobilité est envisagée pour mieux cerner les déplacements à l'intérieur du périmètre analysé. En effet, la mobilité est inhérente au bon fonctionnement de la ville. Ce travail est rendu nécessaire du fait que l'analyse s'opère à l'échelle du plan masse. La plupart des outils de simulation ne traitent le problème qu'à l'échelle de la ville, en le considérant comme une

optimisation de flux à travers un réseau prédéfini. Dans le cas d'un quartier à créer, l'objectif de cette ACV est bien de comparer différentes articulations des bâtiments et réseaux de circulation qui seront plus ou moins acceptables par les utilisateurs, entraînant alors plusieurs modes de transports.

### ACV-régulation

Une ACV-régulation doit venir compléter cette boîte à outils afin de permettre la comparaison de différentes organisations spatiales du cadre de vie urbain. Il s'agit alors, de manière à disposer d'informations cohérentes, de s'assurer que les solutions étudiées sont bien

toutes équivalentes au plan fonctionnel, c'est-à-dire qu'elles rendent bien un même service à l'utilisateur final. Pour les spécialistes, l'objet est de procéder à une revue de projet garantissant que l'analyse de cycles de vie s'effectue sur la base d'une même unité fonctionnelle. □

- (1)- **Equer** : outil d'analyse de cycle de vie du bâtiment développé par les Mines ParisTech en collaboration avec VINCI Construction France.
- (2)- **FDES** : fiche de déclarations environnementales et sanitaires.
- (3)- **SEVE** : système d'évaluation des variantes environnementales. C'est l'éco-comparateur de l'Union des syndicats de l'industrie routière française.

## ABSTRACT

### THE SUSTAINABLE CITY: PROGRESS ENTAILS MEASURING

CHRISTOPHE GOBIN, VINCI - GÉRALDINE THOMAS-VALLEJO, VINCI

*A year ago, the previous issue of Travaux magazine dedicated to the sustainable city described the start of a research effort within the framework of the ParisTech chair on «Eco-design of building complexes and infrastructure». The aim, in particular, was to approach the city as a whole and measure its environmental impact through life cycle analysis. The objective is to obtain, through group work by researchers and operators, tools permitting significant metrics and available for all the stakeholders in a construction project. Here we report the initial results, which will gain in credibility if, in the specialist community, the necessary debate takes place on the essential question of measuring. □*

### CIUDAD SOSTENIBLE: EL PROGRESO PASA POR LA MEDICIÓN

CHRISTOPHE GOBIN, VINCI - GÉRALDINE THOMAS-VALLEJO, VINCI

*Hace ya un año, el número anterior de la revista Travaux dedicado a la ciudad sostenible presentaba el inicio de un esfuerzo de investigación en el marco de la cátedra ParisTech «Ecoconcepción de los edificios construidos y de las infraestructuras». Fundamentalmente, se trataba de aprehender la ciudad en su totalidad y medir su impacto medioambiental mediante el análisis de ciclo de vida. Al final, el objetivo consiste en disponer de un trabajo colaborativo entre los investigadores y los equipos operativos, de herramientas que permitan una referencia métrica significativa y disponibles para todas las partes interesadas de la construcción. En este artículo se presentan los primeros resultados, cuya credibilidad irá aumentando si se instaure, en la comunidad de los profesionales, el necesario debate relativo al planteamiento primordial de la medición. □*



# LA VILLE NUMÉRIQUE

AUTEURS <sup>(1)</sup> : OLIVIER MONIÉ, DIRECTEUR DE LA MARQUE CITÉOS, VINCI ENERGIES - FRANCK BOUDINET, MANAGER SOLUTIONS SENSOR, IBM CENTRE GLOBAL D'INNOVATION À LA GAUDE

**LA VILLE, INTENSÉMENT VIVANTE, GÉNÈRE TOUJOURS PLUS D'INFORMATIONS. SON EXPANSION AUGMENTE SES BESOINS. ANALYSER CES INFORMATIONS POUR NOURRIR CES BESOINS EST L'AFFAIRE DE LA VILLE NUMÉRIQUE. CET ARTICLE FAIT SUITE À UNE SÉANCE DE TRAVAIL ORGANISÉE PAR LA FABRIQUE DE LA CITÉ SUR LES VILLES NUMÉRIQUES <sup>(2)</sup>.**

Les villes occupent 1 % de la surface de la planète. Sur cette infime étendue, vivent plus de 50 % de la population mondiale. Pour 2050, ce seront même 70 % des êtres humains qui se concentreront dans les cités. Cette urbanisation effrénée engendre évidemment toutes sortes de modifications, de problématiques, de dysfonctionnements. Ce sont, pour les villes, plus de consommation, plus de déchets, de gaspillages, une augmentation des transports et de leur vitesse, une demande accrue en eau et en énergie. Les flux entrants et sortants sont toujours plus nombreux, en quantité et en qualité.

Mais, en même temps, cela génère toujours plus d'informations, des informations que l'on sait aujourd'hui compiler, traiter, analyser...

## QU'EST-CE QUE LA VILLE NUMÉRIQUE ?

Si l'on devait répondre rapidement, on pourrait dire que la ville numérique est le résultat du traitement de ces informations et leur mise en pratique.

En fait, la gestion des réseaux (qu'il s'agisse de transports, d'eau, d'énergie, etc.) génère des données que l'on cherche aujourd'hui à utiliser pour améliorer le service rendu. Par exemple, un péage « sait » le nombre de véhicules passants sur une portion de route définie ; il peut aussi connaître les horaires où le trafic est le plus congestionné, les fluctuations de ce même trafic, etc. Compiler, croiser, analyser et interpréter toutes ces informations peut donner lieu à des améliorations tangibles sur le réseau routier. La ville numérique est une image illustrant la pénétration

des technologies numériques dans les systèmes et les réseaux qui structurent les villes : distribution d'eau, d'énergie, éclairage public, systèmes de transports, informations aux usagers de la voirie, vidéo-protection, réseaux d'information, télésurveillance ou télégestion d'équipements publics.

La convergence de ces technologies dans l'ère urbaine favorise même l'émergence du concept de « ville intelligente » qui serait une forme de développement urbain à la fois équipé, interconnecté et intelligent.

In fine, la ville numérique (ou « ville intelligente ») est un supra système, un système de systèmes, dont les informations diverses sont collectées, analysées et transformées en éléments de valeurs pour les autres systèmes, au profit des habitants de la ville.

Si ce n'est déjà fait, la ville doit donc s'équiper d'outils de mesure et interconnecter l'ensemble des systèmes et des processus sur lesquels reposent le développement, la fabrication, l'achat et la vente de marchandises, la fourniture de services, la circulation des biens et des personnes... L'analyse des données recueillies, transformées en informations utiles et structurées, lui permettra de mieux comprendre comment résoudre ses problèmes et de favoriser sa collaboration avec les autres niveaux de gouvernement.

## QUELLES TECHNOLOGIES ?

Ces quinze dernières années, un grand nombre de nouveaux outils et de réseaux ont été développés et mis à disposition dans les espaces urbains. La RFID (« Radio Frequency Identification »,



**1- La ville de Rouen a signé en 2007 avec Citéos un contrat de partenariat public-privé (PPP) sur l'éclairage public, la vidéo-surveillance et la gestion de carrefours à feux de signalisation.**

**1- In 2007, the city of Rouen signed with Citéos a Public-Private Partnership (PPP) agreement for public lighting, video surveillance and the management of signalised intersections.**

PHOTOS 1 & 2 © AUGUSTO DA SILVA - GRAPHIX IMAGES

« Identification par radiofréquence » en français) permet d'identifier un objet, d'en suivre le cheminement, et d'en connaître les caractéristiques à distance grâce à une étiquette émettant des ondes radio, attachée ou incorporée à l'objet.

On reconnaît ce type d'étiquettes sur certaines affiches des panneaux publicitaires. Elles peuvent servir à récolter, à partir d'un téléphone portable, des coordonnées ou des renseignements pratiques sur un spectacle, par exemple. La NFC (« Near Field Communication », « Communication en champ proche » en français) est aussi conçue pour un usage dans les téléphones mobiles.

Il s'agit d'une technologie de communication sans fil permettant l'échange d'informations à courte distance entre des périphériques. La NFC sera utilisée, par exemple, pour acheter des billets électroniques dans les transports publics, les valider, consulter des horaires, etc. Tandis que le WiFi et la fibre optique véhiculent ces données de manière à posséder des informations en temps réel, le GPS, les caméras vidéo, les nombreux capteurs embarqués, les technologies de reconnaissance de forme et de trajectoire contribuent eux aussi à transformer les objets qui nous entourent en nouvelles sources de données.

Enfin et surtout, les technologies logicielles permettent la transformation de ces nouvelles données brutes en informations utiles grâce à des outils

d'analyse de données, de corrélation, d'optimisation en temps réel voire en avance de phase grâce aux « intergiciels » de prédiction.

Ces solutions logicielles sont de plus en plus flexibles et permettent une adaptation rapide et peu onéreuse aux besoins spécifiques d'une ville, d'un quartier, voire d'un usager.

#### QUELLES DONNÉES ?

Les réseaux ou les outils décrits ci-dessous sont essentiels pour capter

**2- Le centre de supervision est le centre névralgique du dispositif intégré mis en œuvre à Rouen.**

**2- The supervision centre is the nerve centre of the integrated system established in Rouen.**

et transporter des données en vue de créer de l'information.

Par conséquent, ce qui nous intéresse, en premier lieu, pour insuffler plus « d'intelligence » dans la ville, ce sont bel et bien les données. Celles-ci sont avant tout des paramètres techniques ou physiques.

Dans le cas d'un réseau électrique, on collectera des paramètres de tension, de puissance, d'intensité... Si on surveille la qualité de l'air, il s'agira de teneur en CO<sub>2</sub>, en soufre... Puis, nous chercherons à mettre en valeur ces données : croiser certaines d'entre elles sur la qualité de l'air et d'autres sur la qualité de l'eau peut s'avérer révélateur.

D'autres types de données peuvent être émises par les citoyens eux-mêmes.

En matière d'éclairage public, il s'agira par exemple de la signalisation de pannes (une personne appelle l'opérateur pour l'avertir que le lampadaire de sa rue ne fonctionne plus).

Cette information renseigne le système d'éclairage public, mais il renseigne aussi le souscripteur sur le temps d'intervention de l'opérateur pour réparer le lampadaire défaillant.

Ainsi, les mêmes données peuvent servir à renseigner différents systèmes.

Enfin, notons que, par construction, la ville est déjà productrice de données, au travers d'une multitude d'informations collectées au fil des années : cadastre, transactions foncières, informations sur les utilisateurs de services publics, ... ▷



2



PHOTO 3 © AUGUSTO DA SILVA - GRAPHIX IMAGES

3

Devenue ville numérique, elle rend intelligibles ces données afin d'être mieux vécue par ses habitants.

### EXPLOITER LES DONNÉES

D'une manière générale, les données collectées peuvent être exploitées à trois niveaux :

- Pour la supervision d'une infrastructure,
- En les corrélant pour optimiser les flux,
- Pour faire de la prédiction sur des systèmes ou des réseaux.

La télé relève dont on entend aujourd'hui beaucoup parler procède du premier niveau. Les compteurs d'eau ou d'électricité dits « intelligents » permettent aux opérateurs de mettre à disposition des usagers une information en temps réel sur leur consommation, de réaliser une tarification précise, de les informer de microcoupures ou de pertes sur le réseau électrique. En supervisant ainsi le réseau de manière fine, les opérateurs disposent d'informations fiables

et sont capables de mieux gérer des ressources qui deviennent plus chères ou plus rares.

C'est le cas sur l'île de Malte qui connaît un fort stress hydrique et doit souvent importer de l'eau douce ou dessaler l'eau de mer. IBM va y déployer pour le compte des compagnies nationales de distribution d'eau et d'électricité un réseau intelligent (smart grid) qui permettra de gérer à distance le réseau (et d'être ainsi plus réactif), de favoriser la détection des fuites, mais aussi de fournir aux usagers des services en ligne, et d'optimiser le processus de facturation pour les faire bénéficier d'économies (paiement de la consommation réelle et non estimée, tarifs rendus flexibles, prépaiement, récapitulatif et monitoring de la consommation via un portail Internet). À terme (fin du chantier en 2012), ce sont 250 000 compteurs intelligents (smart meters) qui vont venir remplacer les compteurs analogiques.

Le deuxième niveau d'exploitation des données (les corréler pour optimiser

**3- En interconnectant les systèmes, la ville numérique produit de nouvelles données qui permettent d'optimiser chaque fonction : distribution de l'eau, transports publics, circulation...**

**3- By interconnecting systems, the digital city produces new data which enable each function to be optimized: water distribution, public transport, traffic, etc.**

les flux) peut être expérimenté chaque jour par les automobilistes franciliens. En effet, depuis le début des années 1990, la Direction interdépartementale des routes d'Ile-de-France (DIRIF) a mis en place Sirius (Système d'information pour un réseau intelligible aux usagers). Grâce à différents outils de mesure (caméras de surveillance, boucles électromagnétiques de détection du trafic...), Sirius intègre et traite des données pour délivrer aux usagers, via des panneaux lumineux, des informations sur les temps de parcours, les encombrements, les incidents et travaux, leur soumettant même des itinéraires alternatifs.

### RETOURS D'EXPÉRIENCE

Dans le même esprit, la ville de Rouen avait signé en 2007 avec Citéos (VINCI Energies) un contrat de partenariat public-privé (PPP) sur l'éclairage public, la vidéosurveillance et la gestion de carrefours à feux de signalisation. Sur l'ensemble de l'agglomération



4



5

PHOTO 4 © LUC BENEVELLO - PHOTO 5 © XAVIER BOYMOND

rouennaise, l'objectif était principalement de diminuer les temps de parcours des automobilistes et des usagers des transports collectifs.

Grâce à la corrélation des données collectées et l'installation de nouveaux équipements (boucles de comptage, caméras, bornes escamotables), la collectivité ambitionnait de réduire de 20 % les temps de parcours aux heures de pointe. Les résultats parvenus en 2010 ont finalement montré une réduction de 28 % le matin et 23 % le soir pour les véhicules. Le temps de retard des transports en commun a pu, lui, être ramené de 25 minutes à 5 minutes en moyenne.

L'optimisation des réseaux de transport devient dans toutes les métropoles un enjeu pour l'aménagement des territoires. Cependant, au fur et à mesure de l'application des technologies, les besoins des citoyens augmentent.

Par exemple, les usagers des transports en commun supportent de moins en moins de ne pas connaître à l'avance

**4- Les systèmes de transports ont été les premiers concernés par le développement du numérique. C'est ainsi que le projet Sirius a été développé dès 1990 en Ile-de-France.**

**5- Installation, par les équipes de Citéos, de caméras de vidéo-protection dans la ville de Courchevel.**

**4- Transport systems were the first systems affected by digital development. For example, the Sirius project in the Ile-de-France region was developed as early as 1990.**

**5- Installation, by the Citéos teams, of video protection cameras in the city of Courchevel.**

les temps d'attente et les durées de parcours ; le processus semble irréversible et l'étape suivante consiste à utiliser les informations pour faire de la prédiction. Car prévoir peut permettre à tous les utilisateurs de la ville de faire des choix plus adaptés à leurs besoins.

À Singapour, ce troisième niveau d'exploitation des données est déjà à l'œuvre. En 2007, la ville asiatique a décidé, en partenariat avec IBM (dans le cadre de son programme Smarter Cities) de valoriser les données de ses péages urbains. Celles-ci sont collectées à partir des comptes utilisateurs associés à des véhicules et expriment une quantité d'informations sur les flux d'automobiles. IBM les a couplées avec d'autres données, plus historiques, recherchant notamment des schémas comportementaux qui peuvent être des indicateurs de problèmes de trafic, les a analysées au moyen d'algorithmes sophistiqués, pour finalement être capable de prévoir des encombrements une heure avant qu'ils se produisent. Ce laps de temps permet à Singapour d'opérer des modifications en faveur du trafic : changer la tarification des péages ou dévier la circulation sur d'autres voies.

#### LA MISE EN RÉSEAU DE LA VILLE

L'exemple évoqué sur Rouen illustre aussi une nouveauté que doivent intégrer tous les acteurs de la ville numérique : la synergie des infrastructures.

En mobilisant différents équipements (signalisation sur voiries, caméras de vidéo surveillance, réseau WiMax, ...) le programme de trafic intelligent de Rouen les a dans le même temps associés et détournés de leur fonction initiale. Dans un schéma traditionnel, ces équipements auraient non seulement été gérés par de multiples opérateurs, mais ils n'auraient, de plus, rempli qu'une fonction. Ici, ils ont été mis en connexion pour produire de nouvelles informations.

Dans notre quotidien, nous rencontrons aussi cette transformation des outils, nous savons qu'un téléphone n'est plus seulement un téléphone, qu'il sert également de terminal Internet, d'outil de pilotage de la domotique, qu'il sera bientôt une carte de crédit ou un ticket de transport. De la même manière, en y introduisant de nouvelles technologies, les infrastructures de la ville vont développer d'autres fonctions que celles pour lesquelles elles ont été construites. Un bon exemple se trouve sur l'île danoise de Bornholm. Le projet EDISON d'IBM y met en connexion le parc d'é-

liennes de l'île et les voitures électriques des particuliers. L'éolien étant soumis à une grande variabilité (en fonction des fluctuations du vent), EDISON se sert des batteries des véhicules électriques à l'arrêt pour stocker l'énergie en surplus venue des éoliennes. Lorsque celles-ci sont au contraire en sous-capacité, les batteries restituent l'énergie au réseau électrique.

#### OBSTACLES PUBLICS, OBSTACLES PRIVÉS

Le projet EDISON nous dévoile aussi un aspect névralgique pour la constitution de villes intelligentes : l'importance des réseaux ouverts. D'ailleurs EDISON est l'abréviation de « Electric vehicles in a Distributed and Integrated market using Sustainable energy and Open Networks » (en français, « Véhicules électriques dans un marché intégré et distribué grâce à l'énergie durable et les réseaux ouverts »). Si objets et infrastructures sont voués à dépasser leur utilité première et à s'interconnecter de plus en plus souvent, encore faut-il leur permettre cette mise en commun. Or, ayant pris conscience de la valeur de ces données, les opérateurs qui les détiennent souhaitent capitaliser dessus et ne sont pas toujours prêts à les partager.

Autre obstacle, plus technique : la non-concordance des données. Issues de différentes méthodes de mesures et manières de faire, elles sont parfois incompatibles. En Scandinavie, des plates-formes d'intégration ont déjà été mises en place entre opérateurs privés et opérateurs publics. Elles peuvent devenir primordiales si l'on veut par exemple mettre en place cette multimodalité des transports tant souhaitée ; autrement dit, une offre intégrant les différents moyens de transport d'une agglomération : bus, tramway, métro, véhicules électriques en auto-partage, vélos en libre service... pour une mobilité plus fluide et plus optimisée.

L'avenir de la ville numérique dépend aussi de son acceptation par ses citoyens. Car l'échange d'informations qu'elle suppose ne peut se faire si ceux-ci ne sont pas contributifs.

Le débat que suscite l'expérimentation actuelle des compteurs intelligents à Lyon et en Indre-et-Loire sur la protection des données le prouve. Pour coproduire les services de la ville, le citoyen doit être dans une relation de confiance avec les grands acteurs de la ville. L'exemple du projet de péage urbain de Stockholm nous éclaire sur ce processus gagnant-gagnant. Alors que l'opinion publique ▽



6

s'était initialement positionnée contre ce projet, il fut finalement plébiscité par un référendum populaire après une phase pilote de 6 mois ; ce « living lab » (terme couramment employé aujourd'hui pour l'expérimentation de projets urbains à taille réelle) avait convaincu la population tant au niveau de la qualité du service rendu que par le retour à une fluidité des transports routiers dans le centre de Stockholm. On peut par conséquent supposer que nos démocraties occidentales sont capables de générer suffisamment de contre-pouvoirs qui veillent au respect de la vie privée ainsi qu'à l'acceptation de grands projets infrastructurels. Mais il est aussi un devoir pour les opé-

rateurs publics ou privés d'expliquer, de faire œuvre de pédagogie, et de favoriser une entière transparence de leurs services. La ville 2.0 est à ce prix.

#### LA VILLE 2.0

Au même titre que le web 2.0 est un réseau ouvert et contributif, la ville 2.0 sera faite pour et par les citoyens, une ville maillée, réticulée, où les informations produites en génèrent d'autres. Une ville où il sera plus facile de communiquer, de se déplacer, où les réseaux seront plus sûrs, plus fiables. Mais ce souci de performance est une tendance lourde pour les collectivités qui ont remarqué que plus leurs citoyens gagnaient en confort de vie, plus ils

**6- Exemple de services urbains dont l'interconnexion permet d'améliorer globalement le service rendu aux habitants (ici pour les déplacements).**

**6- Example of urban services whose interconnection improves the overall service rendered to the inhabitants (here for travel).**

devenaient exigeants sur la qualité des services. Le danger d'une fracture numérique entre les villes existe donc. Or, il y a une évidente corrélation entre le rayonnement d'une ville et sa pertinence technologique. L'attractivité, aujourd'hui au cœur des politiques urbaines, souligne l'importance pour la ville de devenir numérique. Non seulement pour mieux fonctionner mais aussi pour être... durable. □

(1)- Ont également collaboré à la rédaction de cet article : Sylvie Spalmacin Roma, Vice Président, Smarter Cities, IBM France et Frédéric Bauchot, Certified IT architect Solutions Energie et Utilities, IBM Centre global d'innovation à la Gaudie.  
(2)- Pour plus d'informations : [www.lafabriquedelacite.com](http://www.lafabriquedelacite.com)

#### ABSTRACT

### THE DIGITAL CITY

OLIVIER MONIÉ, VINCI - FRANCK BOUDINET, IBM

**The city, intensely alive, tis constantly generating more information. Its needs increase as it expands. Analysing this information to nurture these needs is the role of the digital city.** □

### LA CIUDAD DIGITAL

OLIVIER MONIÉ, VINCI - FRANCK BOUDINET, IBM

**La ciudad, intensamente viviente, genera siempre más informaciones. Su expansión aumenta sus necesidades. Analizar estas informaciones para alimentar estas necesidades es el objeto de la ciudad digital.** □

# RÉHABILITATION D'UNE FRICHE INDUSTRIELLE – TERRAIN DU TRAPÈZE EST DE BOULOGNE-BILLANCOURT (92)

AUTEURS : CHRISTIAN ILLE, DIRECTEUR TECHNIQUE, SOL ENVIRONMENT - CÉDRIC GOURVÈS, CHEF DE PROJET, SITES ET SOLS POLLUÉS, ANTEA

ANCIEN SITE INDUSTRIEL DES USINES RENAULT À BOULOGNE-BILLANCOURT (HAUTS-DE-SEINE), LE TRAPÈZE EST A FAIT L'OBJET, PENDANT PRÈS D'UN SIÈCLE, D'UNE POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES PAR DES HYDROCARBURES (HUILES ET CARBURANTS) ET DES SOLS PAR DES HYDROCARBURES ET DES SOLVANTS ORGANIQUES VOLATILS. SOL ENVIRONMENT, FILIALE DE SOLETANCHE BACHY SPÉCIALISÉE DANS LE DOMAINE DE L'ENVIRONNEMENT, A DÉVELOPPÉ UNE SOLUTION DE TRAITEMENT BASÉE SUR L'EXTRACTION DES MATÉRIAUX POLLUÉS, L'ÉCRÉMAGE IN SITU DES HYDROCARBURES LIBRES FLOTTANT SUR LA NAPPE, LE TRAITEMENT SUR SITE DES MATÉRIAUX POLLUÉS ET LEUR VALORISATION EN REMBLAIS SUR SITE. GRÂCE À UNE TRAÇABILITÉ RIGOUREUSE, LE SUIVI RÉGULIER DE LA QUALITÉ DU SOUS-SOL TOUT AU LONG DES PHASES DE TRAVAUX A FAVORISÉ LA RÉHABILITATION COMPLÈTE DE LA FRICHE INDUSTRIELLE ET SA TRANSFORMATION DURABLE POUR ACCUEILLIR DE NOUVEAUX ÉQUIPEMENTS URBAINS.



1- Extraction des matériaux pollués sous nappe - casier de palplanches et confortement par pieux séquentiels.

1- Extraction of contaminated materials under water table - sheet piling compartment and reinforcement by secant piles.

## CONTEXTE DU PROJET

La société Renault a exploité de 1903 à 1992 une usine de fabrication d'automobiles sur la commune de Boulogne-Billancourt. Le site repose sur une couche de remblais granulaires divers puis sur les alluvions de la Seine (modernes sablo-argileuses et anciennes sablo-graveleuses). Le substratum crayeux est identifié à une profondeur voisine de 15 mètres. Le site est plat à une altitude moyenne de 31,5 m dans le référentiel géographique français (NGF). Les alluvions de la Seine contiennent

une nappe libre rencontrée à une profondeur voisine de 4 mètres. La nappe des alluvions de la Seine se trouve être en continuité hydraulique avec la nappe de la Craie. La Seine, située en limite sud du site, constitue l'exutoire naturel de la nappe des alluvions.

Le site est bordé au nord d'anciens sites industriels démantelés et d'habitations résidentielles à moins de 100 mètres. La limite Est du site est constituée par la rue de Meudon qui est utilisée pour la circulation de transports publics. Après la cessation des activités, des

investigations, menées à la demande de Renault, ont été réalisées par la société Antea, suivant une maille 10 m x 10 m représentant pour la zone de travail 830 sondages à 8 m de profondeur, 3 100 échantillons et 101 700 paramètres analysés sur une superficie de 8,5 hectares. Ces reconnaissances ont permis de quantifier la qualité des sols. L'exploitation du site sur une période de près de 100 ans a induit des infiltrations localisées dans le sous-sol d'hydrocarbures et de solvants organiques volatils.

L'activité industrielle du site s'est développée en utilisant l'eau de la nappe des alluvions de la Seine. Les pompages de la commune et de l'usine ont induit un confinement hydraulique sous le site. Les hydrocarbures infiltrés au cours d'un siècle d'exploitation se sont trouvés piégés dans les alluvions à l'arrêt des pompages.

## PROJET DE RÉHABILITATION

Dans un souci de valorisation des terrains du Trapèze Est, une évaluation détaillée des risques (EDR) a été



**2- Intégration du chantier au sein d'un programme de construction.**



**3- Alvéoles étanches de traitement des terres.**

**4- Déstructuration des infrastructures enterrées.**

**5- Extraction des matériaux pollués hors nappe.**

**2- Incorporation of the site in a construction programme.**

**3- Sealed earth treatment cells.**

**4- Destructuring of underground infrastructure.**

**5- Extraction of contaminated materials outside the water table.**



réalisée par la société Antea prenant en compte différents projets de changement de vocation du site (aménagement paysager, voirie, bâtiment de bureaux ou locaux pouvant accueillir du public avec un ou plusieurs niveaux de parkings en sous-sol, bâtiment destiné au logement avec un ou plusieurs niveaux de parkings en sous-sol).

Des objectifs de réhabilitation ont été définis en fonction des projets de valorisation immobilière envisagés.

Ils concernent 26 paramètres chimiques, organiques et métalliques pour les sols et les gaz du sol.

Les travaux de réhabilitation des terrains du Trapèze Est sont encadrés par un arrêté préfectoral de réhabilitation.

Cet arrêté impose, pour 18 composés chimiques, le traitement systématique des sols présentant une teneur supérieure aux objectifs de dépollution pour un des composés organiques ou métalliques. Un appel d'offres a été lancé visant à satisfaire les exigences de l'arrêté préfectoral et les recommandations de l'évaluation détaillée des risques ainsi que l'extraction des hydrocarbures libres flottant sur la nappe phréatique identifiés au cours des travaux.

Les travaux de dépollution des terrains du Trapèze Est sont confiés en mars 2007 à Sol Environment et se sont poursuivis en continu jusqu'en octobre 2008 pour la première phase.

En mai 2009 les travaux ont repris pour la deuxième phase sous l'ancienne rampe d'accès à l'île Seguin, dans un secteur de l'ancien site industriel en cours de reconstruction après un changement d'usage (photo 2).

## TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Les travaux de préparation ont compris la réalisation de déclarations d'intention de commencement de travaux (DICT), la préparation du plan particulier de sécurité et de protection de la santé (PPSPS), la rédaction des procédures de travail intégrées au plan d'assurance qualité (PAQ) et la mise en place d'une base vie et d'une organisation de chantier spécifique.

Une reconnaissance géophysique couplant des méthodes électromagnétique et radar a été réalisée sur l'ensemble des terrains concernés par les travaux de réhabilitation en vue de l'identification des structures enterrées (canalisations, câbles, galeries...) et la recherche de corps métalliques susceptibles d'être des engins explosifs. Aucun engin explosif n'a été mis en évidence par la prospection géophysique ni mis à jour lors des travaux de réhabilitation.

Cinq alvéoles de traitement étanches ont été créées pour le traitement des terres polluées représentant une surface de traitement de 11 500 m<sup>2</sup>.

Le stockage des terres propres a été réalisé sur dalles et voiries préservées représentant une surface de stockage de 20 000 m<sup>2</sup> (photo 3).

Le projet a compris la réalisation d'excavation profonde sous nappe, jusqu'à une profondeur de 8 mètres par rapport au niveau du sol, en limite de propriété, le long d'une rue utilisée pour la circulation des transports publics. Ces travaux ont nécessité le dimensionnement de confortements des terres visant à soutenir la poussée des terrains et prévenir l'apparition de désordres sur la voie

## UNE MÉTHODOLOGIE DE RÉHABILITATION EN 13 ÉTAPES

- 1- Travaux préparatoires
- 2- Reconnaissances géophysiques non-intrusives préalables pour la localisation de corps métalliques enfouis
- 3- Soutènements en bordure de la rue de Meudon pour permettre des excavations profondes sous nappe en limite de propriété
- 4- Extraction des infrastructures enterrées (câbles, canalisations, fondations, galeries techniques...)
- 5- Extraction sélective des terres non saturées et bétons pollués
- 6- Extraction des terres polluées sous nappe
- 7- Ecrémage des hydrocarbures flottants
- 8- Réception des fonds et bords de fouilles par surface unitaire de 25 m<sup>2</sup>
- 9- Traitement sur site par ventilation et dégradation bactérienne
- 10- Concassage des bétons
- 11- Contrôles de réception des matériaux par lot de 60 m<sup>3</sup>
- 12- Remblaiement, apports extérieurs en complément
- 13- Compactage

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**SURFACE DU SITE :** 85 000 m<sup>2</sup>

**SOUTÈNEMENTS :** 130 ml par pieux sécants représentant 1 500 m<sup>2</sup> de paroi

**EXTRACTION BÉTONS SUPERFICIELS ET ENFOUIS :** 4 300 m<sup>3</sup>

**EXCAVATION HORS NAPPE :** 19 500 m<sup>3</sup> de terres propres et 32 700 m<sup>3</sup> de terres polluées

**EXCAVATION SOUS NAPPE :** 18 300 m<sup>3</sup> de terres polluées

**ÉCRÉMAGE :** 260 m<sup>3</sup> d'hydrocarbures flottants en fouille ouverte et en puits

**RÉCEPTION DES FONDS ET BORDS DE FOUILLES :** Échantillonnage des sols tous les 25 m<sup>2</sup> représentant 1 180 échantillons de sols et de gaz de sol

**TRAITEMENT SUR SITE DES TERRES POLLUÉES PAR DES COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS :** Brassage sous ventilation de 1 500 m<sup>3</sup>

**TRAITEMENT SUR SITE DES TERRES POLLUÉES PAR DES HYDRO-CARBURES :** Activation de la dégradation bactérienne de 48 700 m<sup>3</sup>

**TRAITEMENT SUR SITE DES BÉTONS :** Concassage 20/80 de 4 300 m<sup>3</sup>

**RÉCEPTION DES MATÉRIEAUX EXTRAITS ET TRAITÉS :** échantillonnage des sols tous les 60 m<sup>2</sup> représentant 1450 échantillons sols et bétons

**ANALYSES AU LABORATOIRE :** 2 600 échantillons sur 40 paramètres chimiques (hydrocarbures totaux (HCT), composés organiques aromatiques volatils (BTEX), composés organiques halogénés volatils (solvants chlorés) et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et métaux lourds sur lixiviats représentant une somme de 106 600 paramètres analysés

**REMBLAIEMENT DES FOUILLES :** Utilisation de 74 000 m<sup>3</sup> de matériaux propres et traités sur site réceptionnés

**99 % DES MATÉRIEAUX POLLUÉS TRAITÉS ET VALORISÉS SUR SITE**

**BILAN ENVIRONNEMENTAL DU CHANTIER :** 160 tonnes équivalent carbone émises (30 % des émissions d'un traitement hors site classique)

publique et sur les habitation riveraines. Les DICT ayant confirmées la présence d'un réseau actif de transport de gaz, la solution initiale de confortement par paroi au coulis armée équipée de tirants d'ancrage a été abandonnée au profit d'une solution de confortement par pieux sécants armés (un pieu sur deux) auto-stables. Deux secteurs situés le long de la rue de Meudon ont ainsi été confortés avant excavation.

### TRAVAUX SPÉCIFIQUES DE RÉHABILITATION

Six cuves enterrées de stockage d'hydrocarbures (huile, gasoil, essence, fioul lourd) ont été identifiées, purgées, dégazées, extraites, démantelées et valorisées en matières premières secondaires.

Les matériaux propres et pollués (bétons et sols non saturés et saturés) ont été extraits de manière sélective à l'aide d'engins mécaniques, transférés vers des aires de traitement étanche et traités sur site avant remblaiement.

Les travaux d'excavation hors nappe ont été réalisés en fouille ouverte ou à l'abri de confortement (photos 4 et 5). Les bétons du site, dallages, galeries techniques, fosses et massifs enterrés, ont été déstructurés à l'aide de brises

roches hydrauliques et concassés en 20/80 mm à l'aide de concasseurs mobiles. 4 300 m<sup>3</sup> de bétons ont ainsi été traités sur site et valorisés en remblais. Les travaux d'excavation sous nappe réalisés en fouille ouverte ou à l'intérieur de casiers de palplanches ont nécessité la réalisation d'opérations d'écramage des hydrocarbures libérés par les travaux d'excavation.

Entre 2007 et 2008, 250 m<sup>3</sup> d'hydrocarbures libres, constitués d'huile et de carburant ont ainsi été collectés (photos 1, 6 et 7).

En 2009, au droit de l'ancienne Rampe Daydé, siège historique d'un stockage de charbon puis de fioul lourd, utilisé par le passé pour la production de chaleur et de vapeur, 10 m<sup>3</sup> de fioul lourd et de naphthalène ont été écramés et collectés sur la nappe. Les hydrocarbures collectés ont été évacués soit vers un incinérateur de déchets industriels spéciaux soit vers une cimenterie autorisée pour une valorisation énergétique (photo 8). Le traitement biologique réalisé par activation de la faune autochtone par apport d'oxygène et de nutriments a permis la dégradation des hydrocarbures adsorbés et absorbés dans les sols. Lors du traitement biologique, une augmentation de l'ordre de 1 million UFC ▷



6



7

**6- Extraction des matériaux pollués sous nappe.**

**7- Écramage des hydrocarbures flottants.**

**8- Fioul lourd libéré lors des excavations sous nappe.**

**9- Excavation remblayées et compactées.**

**6- Extraction of contaminated materials under the water table.**

**7- Skimming of floating hydrocarbons.**

**8- Heavy fuel oil released during excavation under the water table.**

**9- Backfilled and compacted excavation materials.**



8



9



(unité formant colonies) a été observée à l'intérieur des andains de traitement associée à une augmentation de température de 10°C.

48 750 m<sup>3</sup> de terres polluées par les hydrocarbures ont ainsi été traités conformément aux objectifs de dépollution déterminés par arrêté préfectoral et évaluation détaillée des risques réalisée par la société Antea en phase préliminaire du projet. Les terres traitées sur site ont été valorisées en remblais sur site (photo 9).

Les terres polluées par des composés organiques volatils (essentiellement des solvants chlorés) ont été traitées par malaxage sous ventilation.

Les effluents gazeux collectés étant traités sur charbon actifs.

**10- Illustration de la traçabilité.**

**10- Illustration of traceability.**

1 500 m<sup>3</sup> de terres polluées par des solvants ont ainsi été traités sur site et valorisés en remblais sur site. La réception des bords et fonds de fouilles et des matériaux propres et traités a été faite par prélèvements de sols, bétons et de gaz de sols par surface unitaire de 25 m<sup>2</sup> de terrains en place et par volume unitaire de 60 m<sup>3</sup> de matériaux foisonnés. Ces contrôles représentent de l'ordre de 2 630 échantillons et 106 600 paramètres analysés.

## UN BILAN TRÈS SATISFAISANT

Le chantier a fait l'objet de procédures de travail spécifiques en fonction des tâches à accomplir et d'une surveillance régulière, interne et externe, des conditions d'hygiène et de sécurité.

Les résultats d'analyses de laboratoire constituent une base de données importante dont l'exploitation permet une parfaite traçabilité des lots de matériaux traités sur une base unitaire de 60 m<sup>3</sup> foisonnés.

Le projet de valorisation de la friche industrielle urbaine du Trapèze de Boulogne-Billancourt est basé sur la connaissance partagée de la qualité du sous-sol avant, pendant et après les travaux de réhabilitation.

Cette information commune à l'administration, l'ancien propriétaire-opérateur et le nouveau propriétaire du site a permis un changement de vocation du site et la valorisation d'une friche urbaine (photo 10).

Le bilan carbone du chantier est estimé de l'ordre de 160 tonnes d'équivalent carbone qui représente moins de 30 % des émissions d'une solution standard

de traitement hors site de terres polluées. 99 % des matériaux pollués ont été traités et valorisés sur site. 1 % des matériaux pollués a été valorisé énergétiquement ou réutilisé en matière première secondaire.

La conception et la réalisation des travaux de réhabilitation des terrains du trapèze Est de Boulogne-Billancourt est basée sur une connaissance détaillée de la qualité du sous-sol avant travaux, de techniques de traitement de la pollution in situ et sur site et d'une valorisation sur site des matériaux traités.

Les techniques de traitement mises en œuvre utilisant des procédés physiques et biologiques ont permis le traitement des sols et des eaux souterraines identifiés pollués. Une telle démarche pragmatique est commandée par la réalité économique et la complexité des impacts liées à près de 100 ans d'activités industrielles. Elle a été jugée adaptée pour atteindre de manière fiable les objectifs du traitement et permettre à Sol Environment de s'engager sur le résultat dans le cadre d'un contrat de type forfait. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Renault SAS**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : Antea**

**BUREAU D'ÉTUDES ET DE RECONNAISSANCES : Antea**

**COORDONNATEUR SÉCURITÉ : Heper Coordination Ingénierie HCl**

**ENTREPRISE GÉNÉRALE : Sol Environment**

## ABSTRACT

### RECLAMATION OF INDUSTRIAL WASTE LAND: LAND AT TRAPÈZE EST IN BOULOGNE-BILLANCOURT (PARIS REGION)

CHRISTIAN ILLE, SOL ENVIRONMENT - CÉDRIC GOURVÉS, ANTEA

**An historic industrial site** sustained contamination of the groundwater by hydrocarbons (oils and fuels) and of the soil by hydrocarbons and volatile organic solvents. Sol Environment, a subsidiary of Soletanche Bachy specialised in the environment sector, developed a treatment solution based on extraction of the contaminated materials, in-situ skimming of the free hydrocarbons floating on the water table, on-site treatment of the contaminated materials and their recycling as backfill on site. Off-site removal was confined solely to the contaminants concentrated by the treatment and the metals recovered as secondary raw materials. Traceability of the edges and bottom of the excavation (1 sample/25 m<sup>2</sup>) and of the batches of treated materials on a unit basis of 60 m<sup>3</sup> expanded volume allows a perfect knowledge of the quality of the subsoil before, during and after the reclamation works. This information, shared by the authorities, the former owner-operator of the site and the new owner, made it possible to change the use made of the site and reclaim an urban industrial waste land. □

### REHABILITACIÓN DE UN SOLAR INDUSTRIAL: TERRENO DEL TRAPÈZE EST DE BOULOGNE-BILLANCOURT (92)

CHRISTIAN ILLE, SOL ENVIRONMENT - CÉDRIC GOURVÉS, ANTEA

**Un sitio industrial histórico** ha sido objeto de una contaminación de las aguas subterráneas por hidrocarburos (aceites y carburantes) y de los suelos por hidrocarburos y diversos disolventes orgánicos volátiles. Sol Environment, filial de Soletanche Bachy especializada en el sector del medio ambiente, ha desarrollado una solución de tratamiento basada en la extracción de los materiales contaminados, la eliminación de aceites y grasas in situ de los hidrocarburos libres que flotan sobre la capa, el tratamiento in situ de los materiales contaminados y su aprovechamiento como material de relleno en el emplazamiento. Las eliminaciones exteriores siendo limitadas a los únicos contaminantes concentrados por el tratamiento y a los metales valorizados en materias primas secundarias. La trazabilidad de los bordes y de las excavaciones (1 muestreo/25 m<sup>2</sup>) así como aquella de los lotes de materiales tratados sobre una base unitaria de 60 m<sup>3</sup> ampliados permite el perfecto conocimiento de la calidad del subsuelo antes, durante y después de las obras de rehabilitación. Esta información análoga para la Administración, el antiguo propietario-operador de las instalaciones y el nuevo propietario ha facilitado un cambio de vocación del sitio y la valorización de un solar industrial urbano. □

# GÉOTHERMIE : LE PROJET ENSTA PARISTECH

AUTEUR : BRUNO DEMARCO, RESPONSABLE DÉPARTEMENT GÉOTHERMIE, MCCF

DANS LE CADRE DU PROJET DE CONSTRUCTION DES NOUVELLES INFRASTRUCTURES DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES TECHNIQUES AVANCÉES (ENSTA), LA SOCIÉTÉ MCCF EST MISSIONNÉE POUR RÉALISER UN CHAMP DE SONDES GÉOTHERMIQUES DE TRÈS GRANDE ENVERGURE (12 KM CUMULÉS, UNE PREMIÈRE EN FRANCE). LE PROJET, QUI VISE UNE CERTIFICATION HQE, EST RÉALISÉ DANS LE CADRE DU PROGRAMME PARISTECH ET PRÉVOIT LA CONSTRUCTION DE SEPT BÂTIMENTS. LA COMPLEXITÉ D'UNE TELLE OPÉRATION NÉCESSITE D'APPORTER UN SOIN TOUT PARTICULIER AU PHASAGE GÉNÉRAL ENTRE LES ENTREPRISES DE TRAVAUX ; IL DOIT TENIR COMPTE DE LA TECHNICITÉ DES MÉTIERS EN LIEN AVEC LES ÉNERGIES RENOUVELABLES QUE SONT LE SOLAIRE, LE PHOTOVOLTAÏQUE ET, ENFIN, LA GÉOTHERMIE. CETTE DERNIÈRE A ÉTÉ DIMENSIONNÉE DE FAÇON À RÉPONDRE À 50 % DES BESOINS DE PUISSANCE NÉCESSAIRE AU PROJET.

## CONSTRUCTION DE 7 BÂTIMENTS

Depuis sa création en 1970, l'École nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA) forme des ingénieurs pluridisciplinaires et accueille des projets de recherche scientifique et technique. Jusqu'alors implantée sur deux pôles (dans le 15<sup>e</sup> arrondissement de Paris et à Palaiseau), cette école voit son entité parisienne rejoindre la palaisienne sur le campus de l'École Polytechnique.

Ce projet est réalisé dans le cadre du programme ParisTech, qui vise à faire du plateau de Saclay un pôle d'excellence scientifique de niveau mondial. Les travaux démarrés depuis mars 2010 ont pour but la construction des infrastructures suivantes (figure 2) :

→ Bâtiment école : d'une surface de 20 400 m<sup>2</sup>, ce bâtiment central disposera des amphithéâtres et salles de cours nécessaires à l'enseignement. Il accueillera également l'administration du site et les trois laboratoires actuellement basés sur le site parisien ;

→ Logements pour élèves : au nombre de cinq, ces bâtiments auront une capacité d'hébergement de 430 studios individuels aménagés sur 10 400 m<sup>2</sup> de surface utile ;

→ Gymnase : cette salle spécialisée partagera ses 1 700 m<sup>2</sup> avec les autres écoles du campus.

Au total, l'ENSTA accueillera environ 700 étudiants et 180 personnels enseignants, chercheurs et administratifs.

## UN PROJET RÉALISÉ EN PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ

Le ministère de la Défense a fait le choix du type de contrat dit d'AOT-LOA (autorisation d'occupation temporaire et location avec option d'achat) : il autorise ainsi un opérateur privé à occuper le site le temps que ce dernier conçoive, construise et exploite l'ouvrage tout en apportant son financement.



Dans le cas présent, le contrat est passé entre le ministère de la Défense et le groupement Génécomi, comprenant les sociétés suivantes : Sogeprom, Société Générale, Adim (représentant de GTM) et Cofely. L'école devrait ouvrir ses portes en 2012. Le client peut ensuite, à tout moment, poser une option d'achat anticipée avant le terme du bail. Le bail initial est prévu sur une durée de 30 ans, soit jusqu'en 2042.

## UN ENSEMBLE DE BÂTIMENTS HQE

Le projet vise une certification haute qualité environnementale (HQE) en phase de construction et en phase d'exploitation. Le choix de faire appel aux énergies renouvelables en fait un projet pilote en matière de développement durable. Plusieurs sources énergétiques sont donc combinées pour alimenter la totalité du projet : chauffage par géothermie, production d'eau chaude sanitaire par panneaux solaires et apport électrique d'origine photovoltaïque. Les pertes énergétiques sont maîtrisées grâce à une isolation des bâtiments par l'extérieur (dont des toitures végétalisées) et à un système de ventilation double flux. ▷

## LES DIFFÉRENTES GÉOTHERMIES

La géothermie verticale se divise en trois catégories :

- **Géothermie haute énergie** (alimentation de turbines électriques) ;
- **Géothermie basse énergie** (chauffage urbain) ;
- **Géothermie très basse énergie** (chauffage de bâtiments individuels).

Les deux premières catégories nécessitent des forages profonds de type pétrolier. La géothermie par sonde et par pompage sur nappe fait partie de la dernière catégorie.

## GÉOTHERMIE À TRÈS BASSE ÉNERGIE

Le système géothermique proposé par le titulaire du contrat entre dans la catégorie de la géothermie à très basse énergie. Celle-ci est prélevée grâce à une ou plusieurs pompes à chaleur. Le principe de la sonde géothermique PEHD double U de type Rehau (photo 3) a été préféré à celui du pompage sur nappe phréatique du fait de sa vertu écologique d'une part, et des difficultés d'exploitation de la nappe sous le plateau de Saclay d'autre part.

Ainsi, pour assurer la puissance suffisante au fonctionnement des futurs bâtiments, la société MCCF (Groupe Solétanche-Bachy) a mis en œuvre pas moins de 12 km cumulés de sondes géothermiques, ce qui constitue la plus grande quantité jamais mise en œuvre sur un même chantier en France.

Le système sera capable de subvenir à 50 % du besoin de puissance total, soit environ 450 kW. Une chaudière gaz classique sera utilisée en appoint.

### ÉTUDES ET DIMENSIONNEMENT

Avant le lancement officiel des travaux, MCCF a, pour le compte de la maîtrise d'ouvrage déléguée Sogeprom, exécuté un forage d'essai à une profondeur de 160 m, qui correspondait à celle envisagée en prédimensionnement par le bureau d'étude Incet (en contrat avec Génecom). Ces travaux préliminaires, exécutés en octobre 2009, comportaient trois objectifs majeurs :

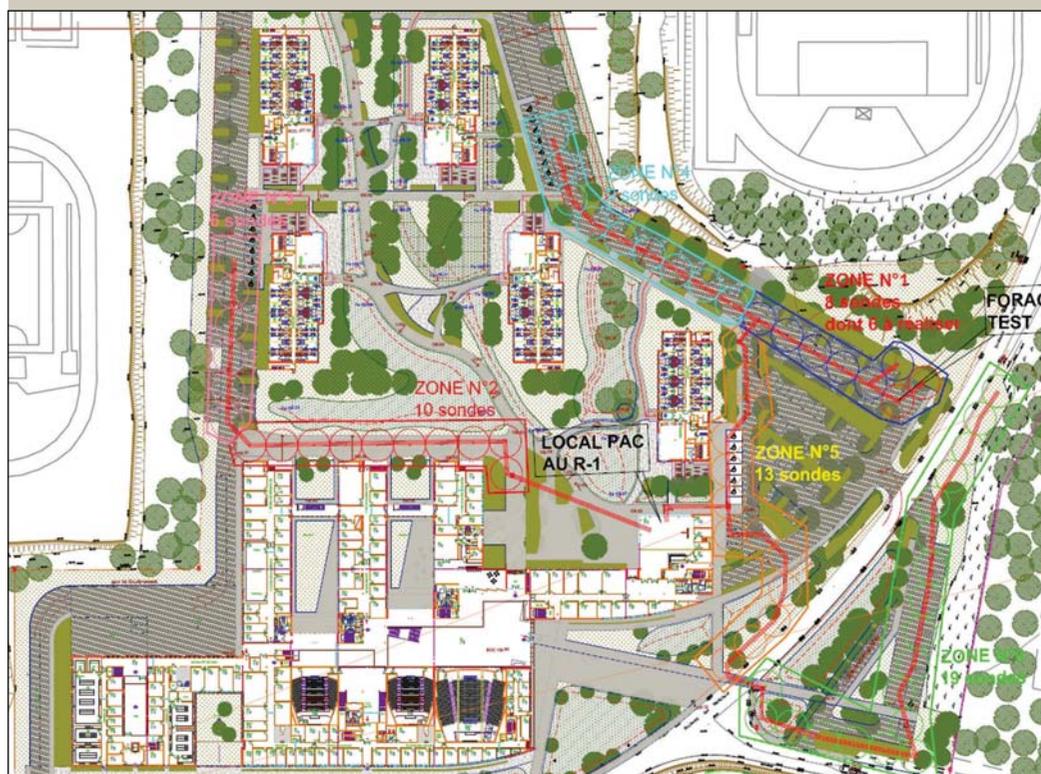
- Valider la faisabilité technique du forage (notamment concernant la maîtrise des sables de Fontainebleau) ;
- Produire une coupe géologique locale ;
- Exécuter un test de réponse thermique (TRT) sur la sonde géothermique équipée par MCCF dans le forage d'essai.

Ce dernier test consiste à mettre un fluide en circulation dans la sonde géothermique.

La température d'entrée étant imposée par le module de mesure, il est possible de déterminer, à partir du delta de température entrée/sortie, les paramètres intrinsèques à la sonde dans son milieu de fonctionnement d'une part (résistance thermique), et au terrain entourant cette dernière d'autre part (température initiale et conductivité moyenne thermique).

Le test a été réalisé début novembre 2009 par Incet (via le bureau d'études Saunier & Associés), et a donc permis de déterminer ces trois éléments nécessaires à la modélisation compor-

## EXTRAIT DE PLAN DU PROJET



2- Extrait de plan du projet.  
3- Sonde sur touret.

2- Excerpt from the project plan.  
3- Probe on cable drum.



tementale du futur champ de sondes. En effet, en fonction de l'énergie soustraite en période de chauffe et de celle réintroduite dans le terrain en période de climatisation, le volume de sol soumis aux cycles de charge/décharge calorifique peut voir sa température moyenne baisser au fur et à mesure des années, ce qui entraîne une chute de performance des pompes à chaleur. Ce phénomène est d'autant plus grand que le déséquilibre entre quantités d'énergie soustraite et réinjectée est important.

La modélisation permet de vérifier que les paramètres spatiaux du champ assureront sa pérennité.

Dans le cas de l'ENSTA, bâtiment dont l'occupation est en grande partie régie

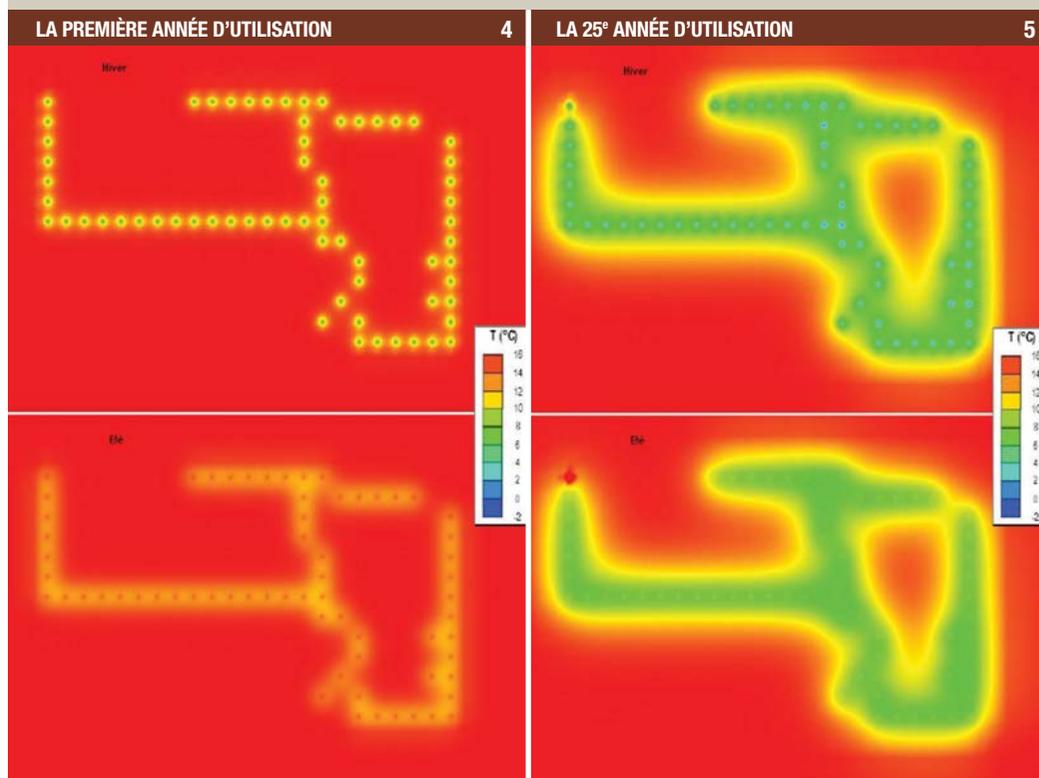
## LE PRINCIPE DES SONDES GÉOTHERMIQUES

Les sondes posées par MCCF (photo 3) permettent de mettre un fluide caloporteur (eau glycolée) en circulation jusqu'à une profondeur permettant de bénéficier du gradient géothermique local.

Chaque sonde dispose de deux tubes aller et deux tubes retour.

Dans le cas d'un champ géothermique, les sondes sont généralement toutes reliées en dérivation via un réseau horizontal enterré et couplées à une ou plusieurs pompes à chaleur. Grâce aux échangeurs de type « plancher chauffant », la pompe à chaleur permet la restitution des calories prélevées au sol. La géothermie par sonde offre un coût d'entretien réduit et présente un intérêt écologique fort puisqu'elle ne nécessite aucun échange de matière avec le sous-sol.

## MODÉLISATION DE LA TEMPÉRATURE DU SOL EN HIVER ET EN ÉTÉ



par les vacances scolaires, la climatisation est quasiment inutilisée en période de refroidissement. C'est la raison pour laquelle le design du champ de sonde modélisé ne présente pas le maillage habituel, mais plutôt des alignements de sondes (figures 4 et 5).

En période estivale, la circulation de l'eau des panneaux solaires (eux-mêmes inutilisés) dans le champ de sonde apporte une sécurité complémentaire au dimensionnement.

Cette solution technique élégante proposée par Incet permet de soulager les panneaux solaires et d'allonger leur durée de vie d'une part, et de participer au rechargement calorifique du sous-sol d'autre part.

Le dimensionnement final du champ de sonde a préconisé 75 sondes géothermiques d'une profondeur unitaire de 160 m.

**4- Modélisation de la température du sol la première année d'utilisation en hiver et en été.**

**5- Modélisation de la température du sol la 25<sup>e</sup> année d'utilisation en hiver et en été.**

**4- Modelling of the soil temperature for the first year of use in winter and summer.**

**5- Modelling of the soil temperature for the 25<sup>th</sup> year of use in winter and summer.**

TABLEAU 1 : SÉRIE GÉOLOGIQUE DU BASSIN PARISIEN

Cote	Formation	Remarques
- 12 m	1- Limons et argiles	Terrain de tête
- 70 m	2- Sables de Fontainebleau	Épaisseur variable
- 100 m	3- Argile - Marnes à huîtres	Marnes indurées parfois très dures
- 115 m	4- Argile verte	Argiles gonflantes sous l'effet de l'eau
- 160 m	5- Marno-calcaire de Saint-Ouen	Bancs calcaires très indurés

production en forage. En conséquence, l'entreprise de forage a dû doubler ses moyens humains et repenser le phasage avec la maîtrise d'oeuvre pour libérer les zones concernées sans pénaliser le planning général du chantier.

### MÉTHODOLOGIE DE FORAGE

La méthodologie est directement liée à la nature des terrains rencontrés.

La coupe de sol, établie une première fois lors du forage d'essai, reflète quasiment l'ensemble de la série géologique du Bassin parisien (tableau 1).

Au droit du forage d'essai, les sables de Fontainebleau avaient la caractéristique de ne présenter aucune cohésion (teneur en argile et niveau de grésification nuls).

Un premier choix technique consistait donc, à la fois pour la tenue du forage et pour limiter le risque géotechnique dans les sables, à proscrire l'utilisation de l'air comme fluide de forage au profit d'une boue bentonitique. L'utilisation d'une telle boue en circuit fermé permet de maîtriser l'effet de cavitation du sable, et donc le risque de tassement sous les futures zones de voiries, voire le tassement différentiel des futures fondations des bâtiments.

Le second choix technique consiste à tuber provisoirement l'épaisseur de sable qui, du fait de son instabilité, ne résisterait pas au passage d'une sonde géothermique sans cette disposition.

Les travaux ont été menés avec deux foreuses de type Hütte HBR205 et Soilmec PSM16GT (photo 1) disposant de doubles têtes de rotation qui permettent, dans le cadre d'une utilisation classique, de forer en tubant à l'avancement.

Dans le cas présent, le couple résistant sur le tubage dans les sables sature le couple moteur de la foreuse avant d'atteindre le pied de ces derniers.

Il est donc nécessaire « d'ouvrir » préalablement le sable pour ensuite y glisser le tubage.

La méthodologie de forage finalement retenue est la suivante :

→ Préforage à la boue en diamètre 170 mm jusqu'à la formation n° 3 ;

→ Remontée du train de tige et outil en 170 mm et descente d'un tubage de diamètre standard 150 mm ancré de 3 m dans la formation n° 3 ;

→ Forage à la boue en 130 mm de diamètre jusqu'à 160 m de profondeur ;

→ Remontée du train de tige et outil en 130 mm ;

→ Équipement gravitaire de la sonde géothermique (photo 6) ;

→ Extraction du tubage ;

### ORGANISATION DES TRAVAUX

Les travaux de forage de ce champ de sondes géothermiques ont démarré en mai 2010 et se sont terminés fin octobre. MCCF, titulaire du sous-lot géothermie, était la seconde entreprise à intervenir sur chantier alors que la société en charge du lot VRD était déjà à l'œuvre. Tout au long des travaux de forage, la coactivité a été grandissante au fur et mesure du démarrage des autres lots, et en particulier du lot gros-œuvre, dont GTM bâtiment est titulaire.

La complexité du projet en termes de coactivité a conduit la maîtrise d'oeuvre, assurée par Coteba, à proposer un phasage particulier.

En effet, pour des raisons évidentes de sécurité et de qualité, les foreuses de MCCF devaient travailler sur des plates-formes de travail stables sous leur poids. Les couches de forme du lot VRD ont donc été utilisées à cet effet. Un découpage du chantier en six zones a permis une rotation des entreprises et assuré un gain de temps certain.

Une fois les sondes géothermiques posées et raccordées sur une zone par MCCF, la couche de forme était remise à disposition de l'entreprise de VRD, qui venait alors terminer sa voirie.

La coordination a cependant été compliquée par un aléa géologique fort (voir plus bas), qui a freiné les cadences de

→ Scellement de la sonde par coulis thermique (remplissage du forage par le fond).

La difficulté du chantier de forage a essentiellement résidé dans la découverte ponctuelle d'aléas géologiques qui n'étaient pas prévisibles en fonction du forage d'essai. L'aléa principal était la présence de bancs de grès au sein des sables de Fontainebleau et de lentilles de gypse au sein des marnes à huîtres. Ces particularités géologiques sont extrêmement indurées et ont eu un impact direct sur la cadence de production des ateliers de forage.

En conséquence, MCCF a dû procéder à des adaptations matérielles et au renforcement des effectifs du personnel de chantier pour mener à bien les travaux.

#### TRAVAUX DE RACCORDEMENT

Étant donnée la configuration particulière du champ géothermique, il a été décidé de collecter les sondes en groupes de 10 à 15 unités répartis en sept regards disposés dans les zones d'espaces verts du projet. Chaque regard dispose donc d'un collecteur aller et d'un collecteur retour alimentant une dizaine de circuits fermés montés en dérivation. Les départs vers les sondes sont munis de vannes de réglage permettant d'équilibrer le débit de fluide frigorigène en fonction des pertes de charges de chaque circuit individuel.

Les travaux de raccordement consistent d'abord à ouvrir des tranchées. Pour chaque sonde, un réseau PEHD aller et retour en diamètre 40 mm est raccordé par électrosoudure du collecteur à la tête de forage.

#### 6- Équipement d'une sonde géothermique.

#### 6- Geothermal probe equipment.

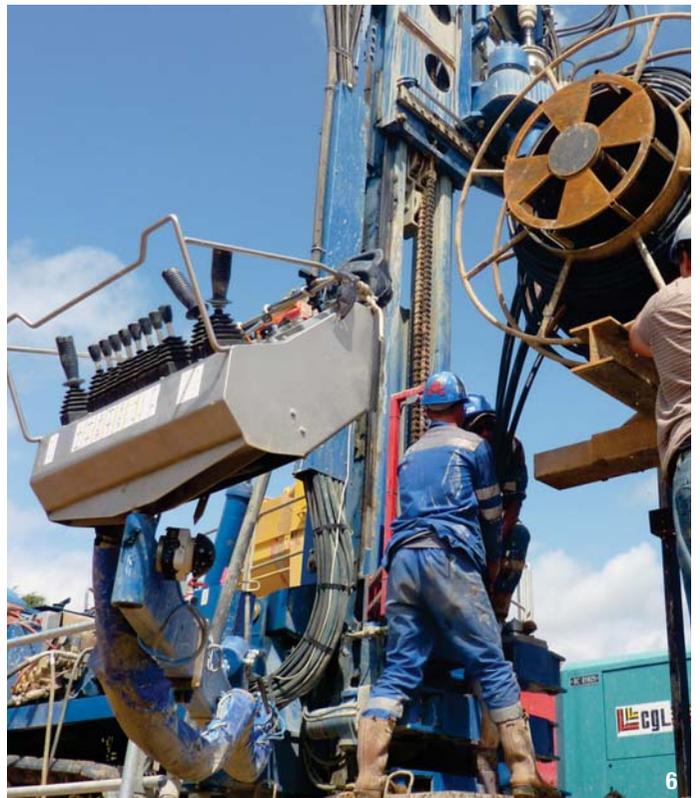
La tranchée est ensuite refermée selon les règles de l'art (sablon, grillage avertisseur, compactage). Dans le cas présent, le remblaiement des tranchées est laissé à la charge du lot VRD.

Chaque regard de collecte est ensuite relié par dérivation aux six autres, de sorte que, au final, MCCF livre à son client deux diamètres 110 mm d'entrée et de sortie pour reprise par l'installateur en vue du couplage aux pompes à chaleur (via échangeurs à plaques).

#### TESTS DE RÉPONSE THERMIQUE

En cours de travaux, la société en charge de la réalisation du champ de sondes est tenue à un certain nombre de contrôles.

Outre les essais classiques de mise en pression des sondes et du réseau enterré, Sogeprom/Incet a missionné MCCF pour la réalisation de tests de réponse thermique complémentaires au test effectué en phase APD du projet. Cette disposition, nécessaire au vu des dimensions du projet et des variations de nature de sols constatées en cours de forage, permet de valider, à l'échelle du champ de sonde, l'homogénéité des paramètres ayant servi au dimensionnement. □



#### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**CLIENT :** DGA (délégation générale pour l'armement)

**OCCUPANT DES LOCAUX :** ENSTA ParisTech

**GROUPEMENT :** Sogeprom (maîtrise d'ouvrage) ; Adim, représentant de GTM (construction) ; Cofely (entretien)

**EN CONTRAT AVEC LE GROUPEMENT :** J.-B. Lacoudre et H. Godet (architectes) ; Coteba (maîtrise d'œuvre) ; Incet (bureau d'études techniques)

**ENTREPRISES :** MCCF (sous-lot géothermie) ; GTM bâtiment (lot gros-œuvre) ; Axima Seitha (lot CVC) ; Colas (lot VRD)

#### ABSTRACT

### GEOTHERMAL POWER: PARISTECH ENSTA PROJECT

BRUNO DEMARCQ, MCCF

**As part of the project for construction of the new infrastructure of the Ecole nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA school of advanced technologies), the company MCCF was commissioned to execute a field of geothermal probes on a very large scale (12 km in all). This first such project in France is managed by the Génecom consortium, awarded a Public-Private Partnership contract with the government. The consortium consists mainly of Sogeprom, Adim and Cofely. The project, which aims at HQE (High Quality of Environment) certification, is carried out as part of the ParisTech programme and provides for the construction (already underway) of seven buildings including a school building, five residential buildings for students, and a gymnasium. The infrastructure, covering an area of about 30,800 m<sup>2</sup>, will receive, by the end of 2012, 700 students and 180 teaching, research and administrative staff members. Given the complexity of such a project, very special care must be taken with the overall scheduling for works contractors; allowance must be made for the high-tech nature of operations related to renewable energies such as solar power, photovoltaic power and, finally, geothermal power. The latter installation was sized to meet 50% of the project's power needs. □**

### GEOTERMIA: EL PROYECTO ENSTA PARISTECH

BRUNO DEMARCQ, MCCF

**Actuando en el marco del proyecto de construcción de las nuevas infraestructuras de la Escuela nacional superior de las técnicas avanzadas (ENSTA), la empresa MCCF cuya misión consiste en realizar un campo de sondas geotérmicas de muy grande envergadura (12 kilómetros acumulados). Esta primicia, en Francia está dirigida por la agrupación Génecom, titular de un contrato de asociación pública-privado con el Estado. Esta agrupación está formada principalmente por Sogeprom, Adim y Cofely. El proyecto, cuyo objeto es la obtención de la certificación HQE, se ejecuta en el marco del programa ParisTech e integra la construcción (actualmente en curso) de siete edificios entre los cuales un edificio escuela, cinco edificios de alojamientos para estudiantes y un gimnasio. Con una superficie de unos 30.800 m<sup>2</sup>, las infraestructuras recibirán, desde finales de 2012, a 700 estudiantes y una plantilla de 180 personas, profesores, investigadores y personal administrativo. La complejidad de semejante operación precisa aportar un particular esmero a la planificación general entre las empresas de trabajos; que debe integrar la tecnicidad de las actividades en relación con las energías renovables como por ejemplo la energía solar, la energía fotovoltaica y, finalmente, la geotermia. Esta última se ha dimensionado con objeto de responder a un 50 % de las necesidades de potencia necesaria para el proyecto. □**

# LA NOUVELLE GARE TGV DES GUILLEMINS À LIÈGE

AUTEURS : BUREAU GREISCH (LIÈGE) : JEAN-MARIE CRÉMER, DIRECTEUR GÉNÉRAL - VINCENT DE VILLE DE GOYET, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE - CLÉMENT COUNASSE, DIRECTEUR INFRASTRUCTURE - YVES DUCHÊNE, RESPONSABLE ÉTUDES SPÉCIALES - VÉRONIQUE FAGNOUL, CHEF DE PROJET

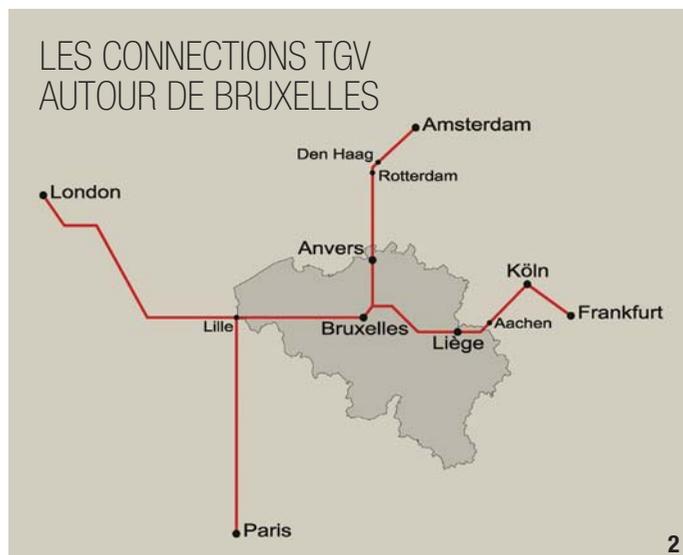
LA NOUVELLE GARE TGV DE LIÈGE EST UNE STRUCTURE DE GRANDE AMPLEUR ET D'UN GRAND ÉLANCEMENT. UN MONUMENTAL DÔME DE VERRE ET D'ACIER DE 200 M DE LONG, FLANQUÉ DE DEUX IMPRESSIONNANTS AUVENTS LATÉRAUX, COUVRE LES VOIES, LES QUAIS ET LE CENTRE DE VOYAGE. CINQ STRUCTURES LONGITUDINALES PROLONGENT CE DÔME PRINCIPAL POUR FOURNIR LES ABRIS DE QUAIS.

LA CONSTRUCTION DE LA GARE, VÉRITABLE DÉFI TECHNIQUE, A ÉTÉ COMPLIQUÉE PAR LA NÉCESSITÉ DE CONSTRUIRE LA NOUVELLE INFRASTRUCTURE PENDANT QUE L'ANCIENNE ÉTAIT ENCORE EN SERVICE. LES ÉTUDES ET LA RÉALISATION ONT DONC NÉCESSITÉ LA MOBILISATION DE COMPÉTENCES TRÈS DIVERSES ET POINTUES AFIN DE MAÎTRISER PARFAITEMENT LE COMPORTEMENT DES STRUCTURES ET DE FAIRE FACE AUX NOMBREUSES DIFFICULTÉS D'EXÉCUTION.

## HISTOIRE D'UNE GARE

En 1835, la première ligne ferroviaire d'Europe voyait le jour en Belgique, en l'occurrence la ligne reliant Bruxelles à Malines. Liège allait être elle-même reliée à la capitale de la jeune Belgique dans les années à venir. Dès 1838, une voie ferrée relie Bruxelles à Ans, à 5 km de Liège. Les trains ne peuvent accéder à la cuvette liégeoise à cause de la trop forte déclivité (pente de 3 %). C'est en 1842, grâce au plan incliné équipé d'un système de treuils et de câbles, que les trains peuvent accéder à la ville de Liège et qu'une première gare en bois est construite dans le quartier des Guillemins. En 1863, cette gare est remplacée par un nouveau bâtiment en maçonnerie de pierre de France, suivant une architecture typique de l'époque avec, en façade, un impressionnant vitrail et un fronton que surmonte une imposante statue féminine symbolisant l'industrie. En 1881 et en 1882, l'édifice reçut d'importantes améliorations.

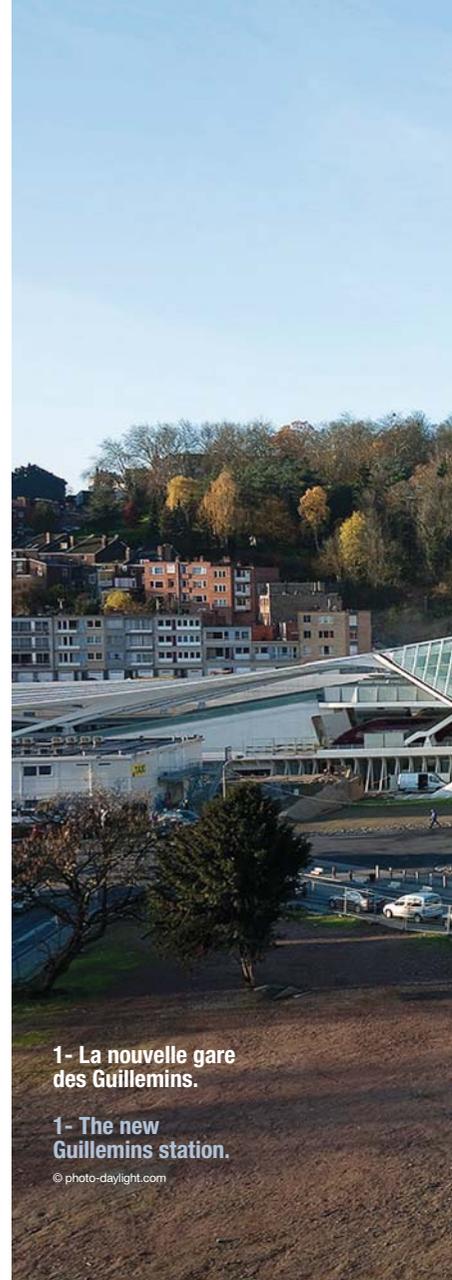
La gare se métamorphosa davantage en 1905, année au cours de laquelle elle trouva toute sa splendeur à l'occa-



sion de l'Exposition universelle de Liège (photo 3). En 1958, la « gare Belle Époque » est remplacée par un bâtiment d'architecture moderniste, probablement pour être plus en harmonie avec son temps, alors que Bruxelles s'enorgueillit de son Exposition internationale.

2- Les connexions TGV autour de Bruxelles.

2- High-speed train connections around Brussels.



1- La nouvelle gare des Guillemins.

1- The new Guillemins station.

© photo-daylight.com

## ÉVOLUTION DU RAIL

Au cours des deux dernières décennies du XX<sup>e</sup> siècle, l'univers du rail, concurrencé par la route, est profondément bouleversé par les développements technologiques. Si le train à grande vitesse en est, à juste titre, le symbole, les nouvelles infrastructures, et principalement les gares, sont pensées de manière à bénéficier aussi aux utilisateurs. Cette philosophie a prévalu pour la gare de Liège-Guillemins, à savoir conserver toutes les activités, services intérieur et international, sur un même site pour que les investissements profitent au plus grand nombre de voyageurs. En outre, par rapport au transport aérien, l'attrait et la compétitivité de la grande vitesse ferroviaire sont étroitement liés au fait d'amener les voyageurs au cœur d'une ville. Aujourd'hui, la majorité des projets européens de grande vitesse tiennent compte des nombreux déplacements d'affaires entre les grandes métropoles. Le seuil fatidique des 3 h de trajet entre gares semble donc essentiel, et les relations en 3 h ou moins restent les plus porteuses



(figure 2). Dans la concurrence train-avion, les points forts du réseau européen grande vitesse se situent dans les liaisons entre Paris, Londres, Bruxelles, Amsterdam et Cologne. Les relations inférieures à 2 h sont du domaine quasi-exclusif du chemin de fer.

### LA NOUVELLE INFRASTRUCTURE

À Liège, les infrastructures ferroviaires vieillies ne permettaient pas d'accueillir les trains à grande vitesse dans de bonnes conditions. Différents éléments pénalisaient le site de l'ancienne gare : des quais en courbe et trop étroits,

une vitesse très faible aux abords de la gare, de nombreux cisaillements de voies, un mauvais positionnement de l'axe Bruxelles-Allemagne dans la gare alors qu'il est l'axe le plus fréquenté. Par rapport à l'ancien bâtiment, l'axe de la nouvelle gare est déplacé de 150 m pour répondre à un double impératif :

- Construire des quais rectilignes facilitant l'accès des trains en gare et l'embarquement/débarquement des voyageurs ;
- Établir une liaison harmonieuse entre la gare et le réseau autoroutier tout proche.

La liaison avec le réseau autoroutier est assurée par un pont suivi d'un viaduc. Cet accès à la gare côté colline est complété par une offre de parkings jouxtant les quais et comptant 600 emplacements. La gare compte désormais neuf voies et cinq quais. Trois d'entre eux, longs de 450 m, peuvent accueillir les doubles rames TGV (photo 4). Accessible côté ville mais aussi côté colline, la gare jouit de deux entrées que près de 10 m de dénivellation séparent. ▷

**3- La gare Belle Époque.**

**3- The Belle Époque station.**

Cela explique que le bâtiment s'organise essentiellement sur trois niveaux (figure 5) :

→ Le passage sous voies accueille le centre de voyage de plain-pied, côté ville, avec l'espace urbain devant la gare, traité essentiellement en place piétonne ;

→ Les quais et les voies sont situés au niveau intermédiaire ;

→ La plate-forme routière, côté colline et accessible par le viaduc, est située au même niveau que les passerelles qui surplombent les voies.

Vaste espace sans façades donnant directement sur la ville, la gare est une structure ouverte qui confère à l'édifice une extraordinaire transparence. La conception, toute de symétrie, lui offre une très grande lisibilité (photo 6). L'ingénieur et architecte Santiago Calatrava en est le concepteur. EuroLiège TGV, le maître d'ouvrage, l'a choisi à l'issue d'un appel d'offres international. Calatrava a confié au bureau Greisch l'ensemble de la mission de stabilité et l'assistance à la direction des travaux.

En particulier, il s'agissait de :

→ Définir et prendre en compte les risques dus à l'instabilité de la colline de Cointe, située à l'arrière du bâtiment ;

→ Examiner en détail le comportement de la toiture sous le vent et adapter le dimensionnement en conséquence ;

→ Étudier en détail les phases d'exécution et leurs implications ;

→ Réaliser les études en conformité avec les normes belges en vigueur ;

→ Assurer les missions de pilotage et de coordination.

#### CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

La construction d'un parking jouxtant la nouvelle gare côté colline de Cointe implique l'enlèvement du pied de cette colline sur quelque 200 m de longueur et sur une petite vingtaine de mètres de hauteur. Cela a nécessité un grand nombre d'investigations, d'études et de mesures particulières afin de s'affranchir de tout risque de glissement de terrain. La stabilité de certaines couches de sol est précaire dans cette zone.

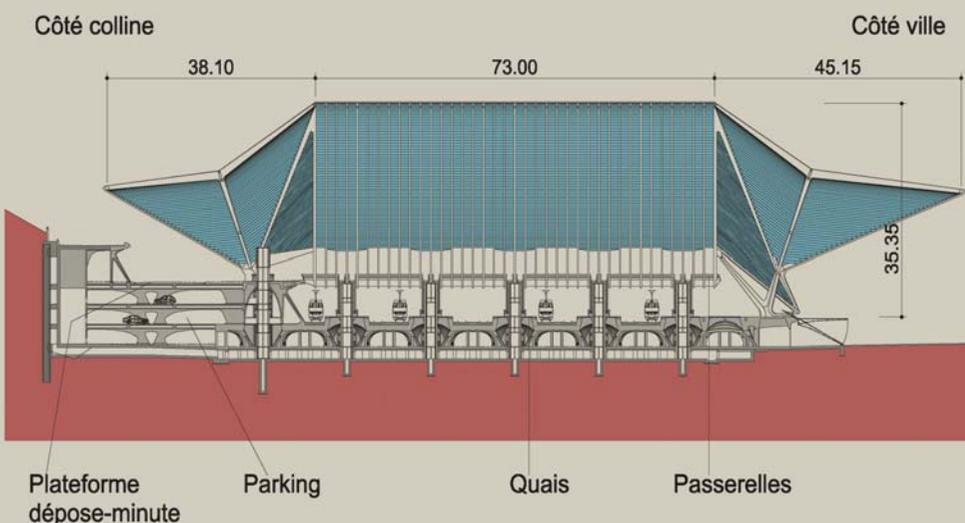
En 1950, un glissement de terrain de plusieurs milliers de m<sup>3</sup> a complètement recouvert et immobilisé des voies et des quais sur le site de l'ancienne gare, à 300 m de la nouvelle implantation.

Une campagne de reconnaissance de sol a été effectuée en plusieurs phases sur ce versant avec l'aide de spécialistes en géologie et géomécanique de l'université de Liège. Cette campagne a mis en évidence le pendage particulièrement défavorable des terrains. Outre les poussées des terrains meubles



© photo-daylight.com 4

#### COUPE TRANSVERSALE DE LA GARE



5

**4- La gare et son environnement.**

**5- Coupe transversale de la gare.**

**4- The station and its environment.**

**5- Cross section of the station.**

supérieurs et des nappes phréatiques, il fallait considérer les risques inhérents à la présence de couches de charbon susceptibles de former des plans privilégiés de glissement sous les bancs rocheux et de provoquer des poussées de retenue importants (figure 7).

#### DÔME DE VERRE ET D'ACIER

La nouvelle gare est un monumental dôme de verre et d'acier de 200 m de long qui couvre les voies, les quais et le centre de voyage (photo 8). Ce dôme

comporte un corps central de 73 m de largeur flanqué de deux impressionnants auvents latéraux de 39 et 45 m, en porte-à-faux au-dessus de la place, côté ville, et au-dessus du dépose-minute, côté colline. Cinq structures longitudinales prolongent le dôme principal pour fournir les abris de quais. Le fonctionnement de la gare, qui s'organise sur trois niveaux, impose évidemment la base du système structurel :

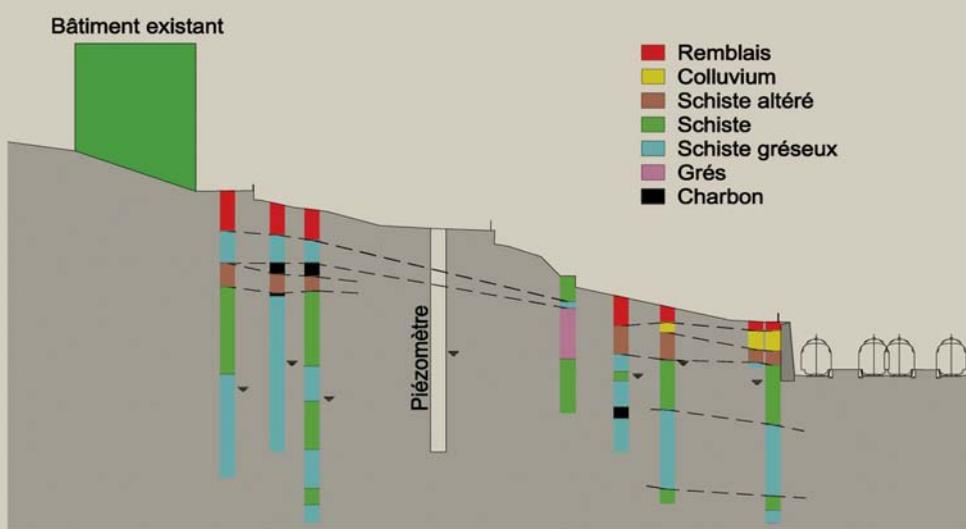
→ Le couloir sous le niveau de circulation des trains, entièrement en béton armé, est surmonté de ponts-bacs en béton précontraint supportant les voies et les quais ;



© photo-daylight.com

6

## CONTEXTE GÉOTECHNIQUE



7

→ Les quais en béton, recouverts de pavés de verre apportant de la lumière au couloir sous voies, sont portés par des lamelles inclinées en béton armé qui s'appuient sur les ponts-bacs ;

→ Les deux passerelles transversales métalliques au-dessus des voies, qui permettent l'accès aux quais depuis l'aire de dépose-minute, sont en fait les éléments structurels principaux et portent le corps central du dôme. Elles prennent appui sur les quais par l'intermédiaire de cinq quadripodes métalliques.

À l'arrière de la gare, le parking de trois niveaux en béton armé, érigé dans le

piéd de la colline de Cointe, assure presque à lui seul la butée nécessaire à l'équilibre des formidables poussées horizontales que les terrains exercent sur l'édifice.

### UN PARKING EN PIED DE COLLINE

L'analyse des données géotechniques des terrains de la colline montre que le pendage et la nature des couches constitutives sont très défavorables. L'importance des forces de retenue à mettre en œuvre a conduit à retenir les concepts suivants :

→ En phase de travaux (figure 9), la stabilité du versant est assurée par un

important rideau de pieux forés sécants en béton C 25/30 armé, d'un diamètre 1,50 m. Chaque pieu est ancré, au fur et à mesure des phases de creusement, d'une profondeur de 18 m à l'aide de tirants d'une puissance de 750 kN pour les lits supérieurs et de 1 000 kN pour les lits inférieurs. La poussée de l'eau sur le rideau de pieux est limitée par rabattement de la nappe aquifère du versant ;

→ En phase de service (figure 10 et photo 11), les tirants d'ancrage sont considérés comme inexistantes.

La structure du parking est donc conçue pour résister aux charges verticales habituelles, mais aussi pour assurer la reprise des importantes forces de poussée des nappes phréatiques et des terrains de la colline.

Les voiles transversaux en béton armé des parkings sont particulièrement sollicités. La qualité du béton a notamment dû être portée à la classe C 40/50 pour le niveau inférieur tout en recourant à un taux d'armatures élevé, allant localement jusqu'à 250, voire 300 kg/m<sup>2</sup>. Grâce à sa sous-face crantée et au poids propre du parking, le radier assure la stabilité vis-à-vis du glissement et la transmission des efforts horizontaux vers le bedrock.

### UNE INFRASTRUCTURE TRÈS OUVRAGÉE EN BÉTON APPARENT

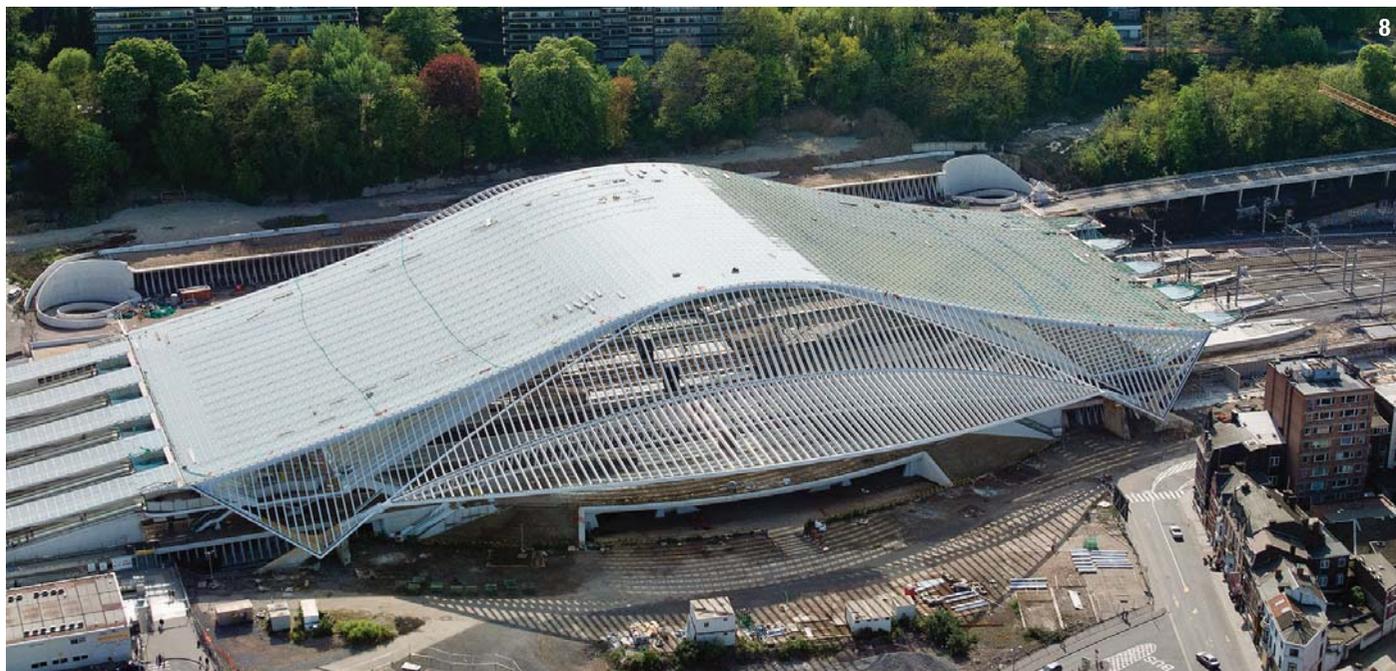
Si la partie la plus imposante de la nouvelle gare est sans conteste son dôme d'acier et de verre, qui culmine à 40 m ▷

6- Vue de la façade.

7- Contexte géotechnique.

6- View of the facade.

7- Geotechnical context.



8

© photo-daylight.com

au-dessus de la place urbaine, le projet comprend aussi la mise en œuvre de quelque 65 000 m<sup>3</sup> de béton armé répartis entre le parking (28 000 m<sup>3</sup>), le passage sous voies et les couloirs techniques sous voies (17 000 m<sup>3</sup>), l'entrée de la gare avec ses deux grands escaliers, le centre de voyage, les espaces commerciaux et de service (13 000 m<sup>3</sup>), et enfin les bassins d'orages, les supports des auvents et ouvrages divers (7 000 m<sup>3</sup>).

D'une manière générale, dans toutes les zones accessibles aux voyageurs, le béton apparent blanc est le matériau le plus présent, sous des formes particulièrement complexes. Les formes à courbure variable dans une, voire deux directions (photo 12), nécessitent une étude très poussée des coffrages et de leur support. La réalisation même des moules de coffrages courbes requiert, le plus souvent, l'usage de pièces de bois travaillées selon des formes 3D complexes.

L'utilisation du béton blanc (photo 13) est réservée aux ouvrages architecturaux et structurels apparents situés dans les espaces accessibles aux voyageurs. Pour éviter toute improvisation, la réalisation préalable d'éléments prototypes a permis à la fois de se familiariser avec ces problèmes et, surtout, d'appréhender les difficultés et de mettre en évidence l'influence des divers paramètres sur l'aspect final du béton blanc. De nombreux prototypes ont été réalisés au chantier, et l'expérience acquise lors de l'exécution de ces pièces d'essai a démontré que

**8- Vue aérienne de la verrière.**

**9- Construction des parkings - 1<sup>re</sup> phase.**

**10 & 11- Construction des parkings - 2<sup>e</sup> phase.**

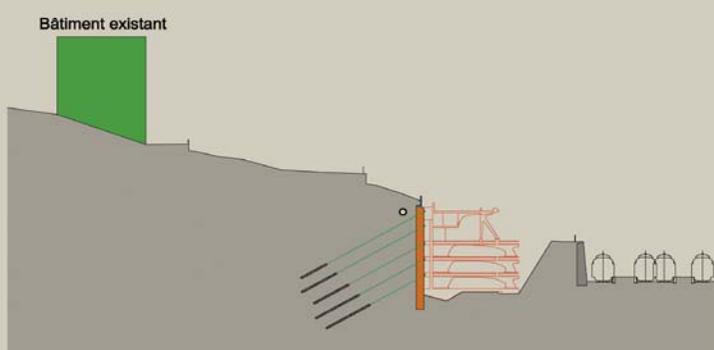
**8- Aerial view of the glass roof.**

**9- Construction of parking lots - phase 1.**

**10 & 11- Construction of parking lots - phase 2.**

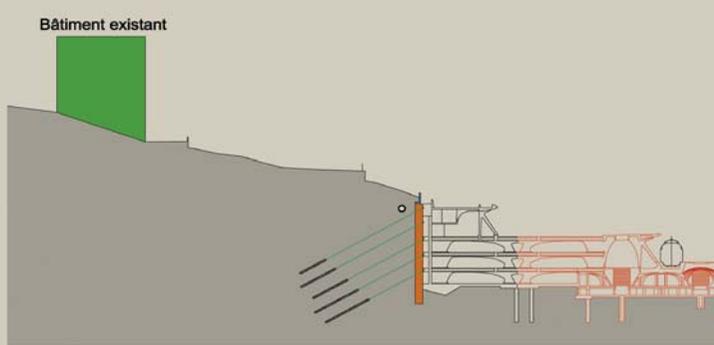
## CONSTRUCTION DES PARKINGS – 1<sup>re</sup> PHASE

9



## CONSTRUCTION DES PARKINGS – 2<sup>e</sup> PHASE

10



11

© photo-daylight.com

la maîtrise de tous ces paramètres demande beaucoup de rigueur et de connaissances.

## TOITURE EN VERRIÈRE

La toiture, couverte sur toute sa surface par une verrière, est une structure imposante par ses dimensions et sa géométrie (figures 14a et 14b). Longue de 198 m en façade, sa dimension transversale maximale est de 156,25 m, et le sommet est situé à plus de 35 m au-dessus des quais. En direction de l'Allemagne, elle est prolongée par cinq abris de quais dont les plus longs font plus de 200 m (photo 15). L'examen de la structure permet de mettre en évidence quatre parties distinctes :

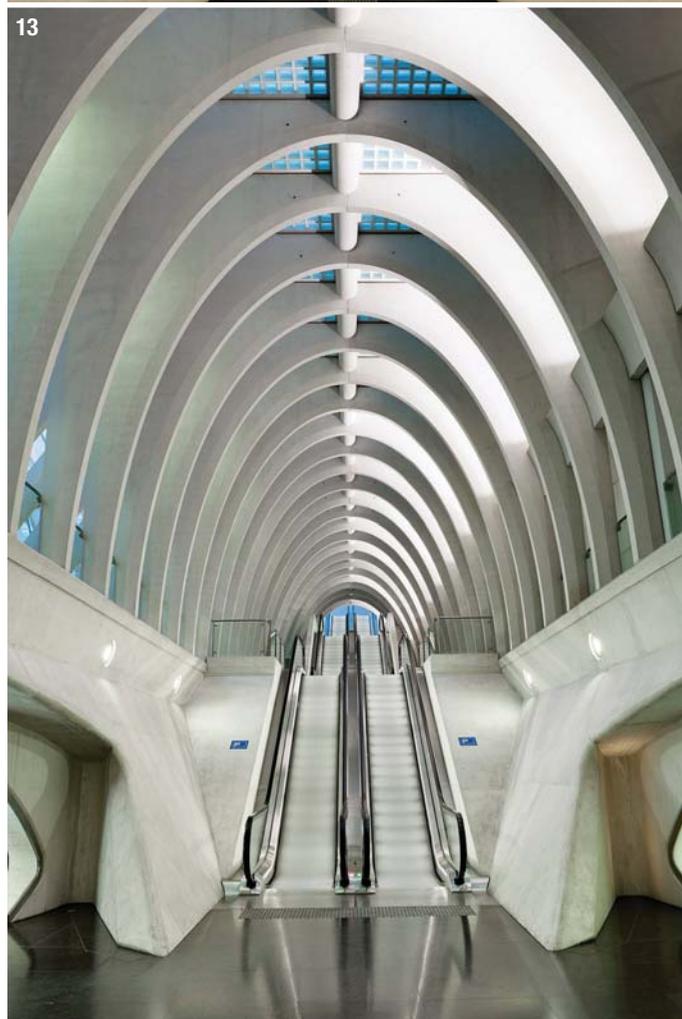
→ Le corps central, constitué de 39 arcs métalliques disposés dans des plans verticaux parallèles aux quais, d'une portée de 157 m et distants de 1,92 m. Dans leurs parties descendantes et en continuité dans le même plan, ces arcs sont surmontés de poutres retroussées supportant la verrière du dôme central ;

→ Les deux poutres transversales sur lesquelles les arcs prennent appui. Disposées à 5,95 m au-dessus des quais, elles sont utilisées comme passerelles et assurent la liaison entre le dépose-minute et les différents quais par des escaliers et des escalators ;

→ Sous chaque passerelle, cinq quadripodes métalliques servent d'appuis et transmettent les charges au sol. Pour limiter la déformabilité d'ensemble du corps central, la structure support des escalators a dû être prise en compte en vue de réduire drastiquement les déplacements horizontaux des passerelles sous les efforts dissymétriques du vent ;

→ Les deux auvents, situés à l'avant (photo 16) et à l'arrière de la couverture principale, en assurent la stabilité transversale et servent d'abris aux zones d'accès des voyageurs. Côté ville, ils prennent appui sur deux tripodes en béton blanc. Côté colline, c'est la structure de liaison entre le parking et la gare qui leur sert d'appui, avec deux grandes poutres précontraintes en encorbellement.

Les 39 arcs et les poutres retroussées associées au corps central de la toiture ont des sections métalliques de type caisson reconstitué-soudé, composées d'un tube circulaire qui joue ainsi le rôle de semelle inférieure, d'âmes de hauteur et d'épaisseur variables, et d'un plat de semelle supérieure, de largeur et d'épaisseur également variables (figure 17).



© photo-daylight.com

**12- Passage sous voies : les courbes.**

**13- Béton blanc – entrée des parkings.**

**12- Track underpass: the curves.**  
**13- White concrete – parking lot entrance.**

## PASSERELLES TRANSVERSALES

D'une largeur totale de 14,40 m (figure 18), elles sont constituées de deux caissons principaux d'une largeur de 2 000 mm et d'une hauteur de 1 052 mm. Les passerelles et les arcs sont entièrement solidarités et forment l'ossature de base de la couverture : les arcs transmettent les charges dans le sens longitudinal, les passerelles, dans le sens transversal, et l'ensemble repose sur les quadripodes qui pren-

nent appui au sol. Les passerelles, qui reprennent les charges de toiture, permettent de franchir les voies et de prendre appui au sol au centre de chacun des quais. Ces appuis sont des quadripodes (photo 19), constitués chacun de quatre caissons métalliques disposés suivant les arêtes d'une pyramide à quatre faces posée sur sa pointe.

La transmission des efforts aux fondations est réalisée au moyen d'un appareil d'appui de type rotule sphérique.

## CHARGES SUR LA COUVERTURE

Les charges appliquées sur la couverture sont transmises aux arcs. Ceux-ci prennent appui sur les passerelles et induisent alors des efforts dirigés, d'une part, vers l'extérieur (figures 20a à 20c, en rouge), et, d'autre part, par les poutres retroussées, vers l'intérieur (figures 20a à 20c, en vert). Les efforts d'arcs étant nettement plus importants que ceux transmis par les poutres retroussées, l'ensemble constitué d'une passerelle et de ses cinq quadripodes est donc sollicité par des efforts dont la résultante est oblique, ce qui entraîne une torsion de la passerelle, une rotation des naissances d'arcs et, par conséquent, un déplacement vertical de la clef d'arc. Pour limiter cet effet, comme dit plus haut, la passerelle est appuyée transversalement sur la structure de support des escalators intérieurs.

## ARCS DES AUVENTS

Leur structure portante (photo 21) est constituée de quatre arcs, tous appuyés, à leur naissance, sur des tripodes en béton :

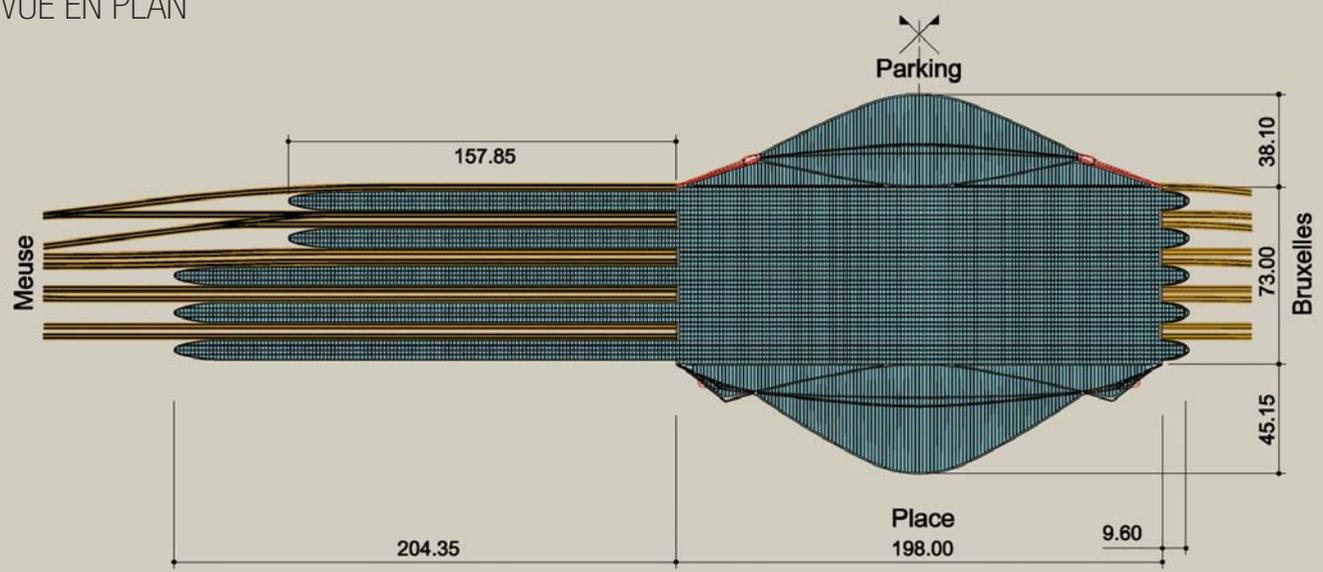
→ Les arcs A2 et A3 (figure 22) constituent les membrures inférieure et supérieure d'une poutre à échelle, structure portant la majeure partie des charges de l'auvent ;

→ L'arc A4, solidarisé en clef avec la toiture principale, en assure principalement la stabilité transversale ;

→ L'arc A1, le plus excentré, porte l'extrémité de l'auvent.

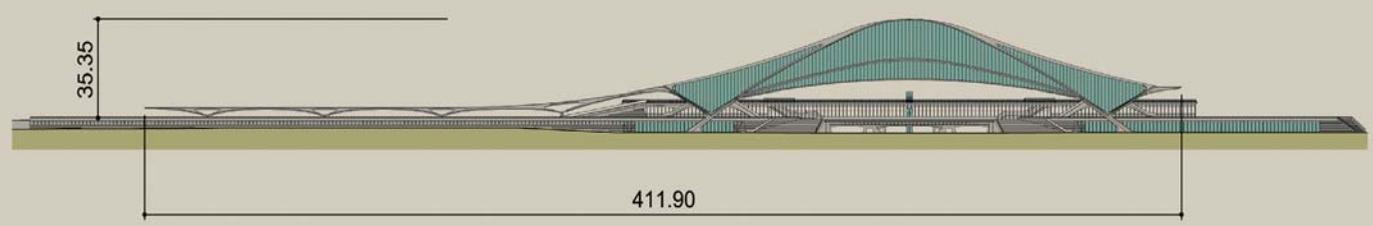
Les pannes, qui relient les arcs entre eux et assurent ainsi la continuité des efforts dans le sens transversal, servent également de support aux châssis de la verrière. Le schéma statique transversal de la toiture peut être assimilé à celui de l'ossature d'une tente de camping construite sur pilotis (figure 23) : la passerelle et les quadripodes représentent le plancher et les pilotis ; les arcs de la toiture principale, la toiture principale, la toiture principale de la tente ; et les arcs A4 des auvents, les tendeurs. ▷

VUE EN PLAN

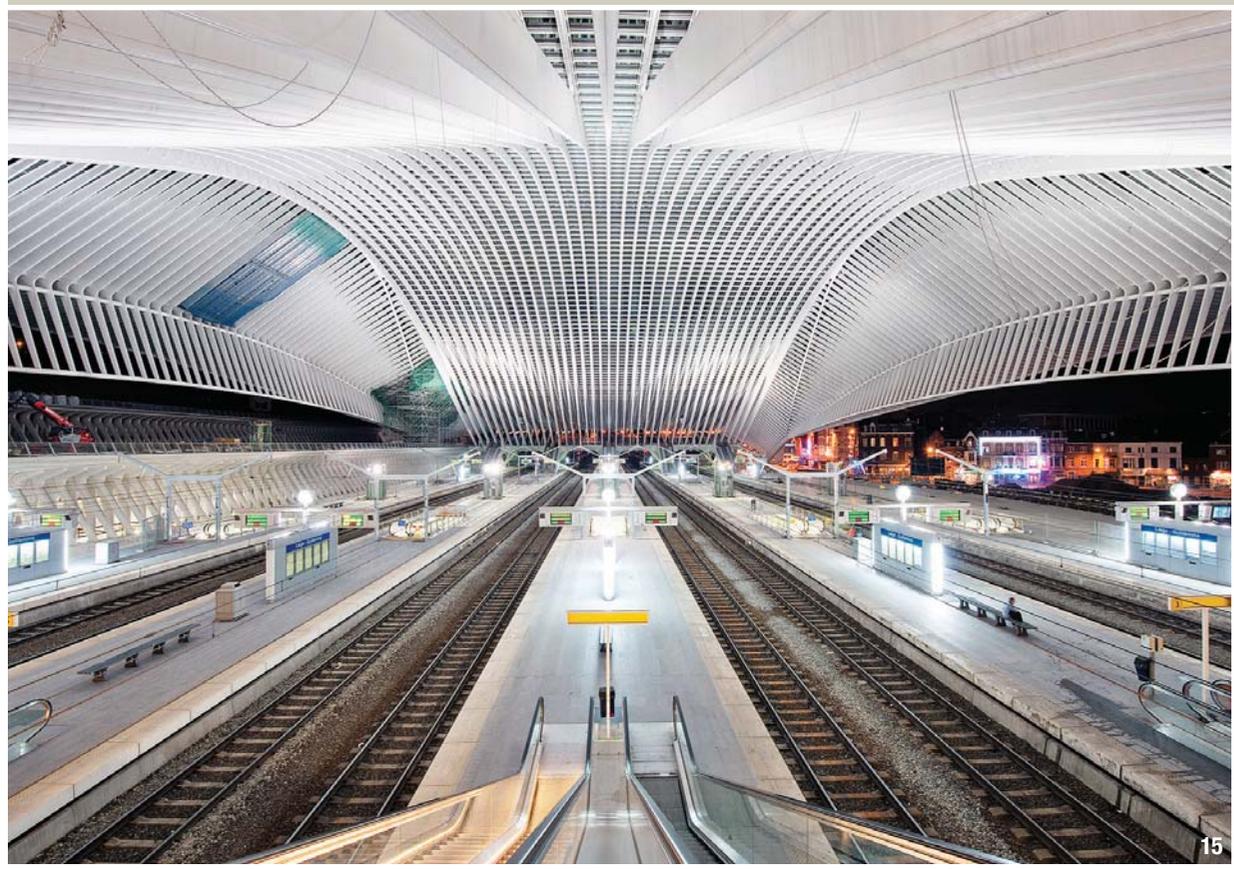


14a

VUE EN ÉLÉVATION



14b



14a & b-  
Vue en plan  
et élévation.  
15- Couverture.

14a & b- Plan  
and elevation  
views.  
15- Roof  
covering.

© photo-daylight.com

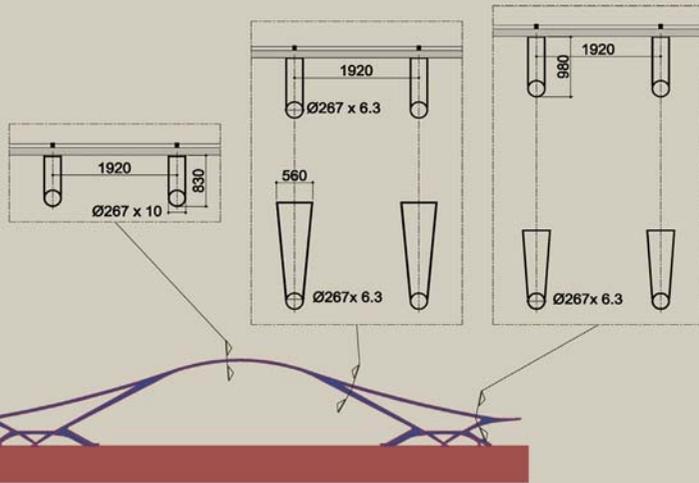


© photo-daylight.com

16

## GÉOMÉTRIE DES SECTIONS D'ARCS

17



16- Auvent, côté ville.

17- Géométrie des sections d'arcs.

18- Passerelle et quadripodes.

19- Quadripode.

16- Canopy, city side.

17- Geometry of arch sections.

18- Foot bridge and quadripod structures.

19- Quadripod structure.

Les auvents appuyés sur les tripodes sont en porte-à-faux par rapport à cette structure portante. Leur différence de longueur, donc de poids propre, et leur excentrement provoquent un déséquilibre. Celui-ci est repris essentiellement par les arcs A4 qui jouent le rôle de stabilisateurs transversaux, et génère un déplacement transversal de 14 cm sous le seul poids de la structure métallique et de la verrière.

### SOLLICITATIONS SUR L'ÉDIFICE

Outre les fortes poussées des terrains de la colline à équilibrer principalement par la structure et le radier du parking, les charges appliquées à l'édifice sont, en plus des sollicitations habituelles :

- Pour les ponts-bacs portant les voies au-dessus du passage sous voies, les charges classiques des convois ferroviaires, y compris le poids du ballast et les efforts de freinage et d'accélération ;
- Pour la couverture de la gare, toutes les sollicitations qui s'appliquent à des toitures de grande surface, à savoir le poids propre de la structure et de sa couverture en verre, les surcharges d'utilisation des passerelles, et surtout les actions du vent.

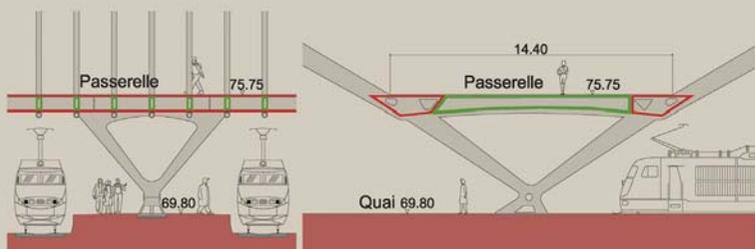
Dans ce qui suit, seules les actions sur couverture sont définies, en insistant principalement sur les actions du vent. L'étanchéité de la toiture est assurée par une verrière de 30 000 m<sup>2</sup> qui couvre l'ensemble de la surface de la gare et des quais. Les charges permanentes se répartissent de la façon suivante :

- Poids propre de la structure métallique : partie centrale, 4 300 t ; deux auvents, 3 050 t ; deux passerelles, 3 000 t ;
- Poids de la verrière : 1 350 t.

Les types de charges variables prises en considération sont : la température (variation uniforme de 30°, gradient de 10°) ; la neige (350 à 400 N/m<sup>2</sup>) ; la foule sur les passerelles (5 000 N/m<sup>2</sup>). ▷

## PASSERELLE ET QUADRIPODES

18



© photo-daylight.com

19

### PRESSIONS DE VENT

Le comportement au vent a fait l'objet de deux approches complémentaires : la première, à partir de la norme belge au vent (NBN B 03-002-1 et NBN 03-002-2), pour assurer le prédimensionnement de la structure ; la seconde, à partir d'essais en soufflerie, pour vérifier que le dimensionnement était sécuritaire sans excès.

La philosophie de la norme belge au vent est fort similaire à l'Eurocode.

La vitesse de référence du vent est basée sur une notion de période de retour. Dans la norme belge, elle correspond à une période de 10 ans et a pour valeur 23,6 m/s.

Après une analyse détaillée des vents basée sur des statistiques couvrant une trentaine d'années, l'annexe belge de l'Eurocode EN 1991-1-A a adopté une vitesse de 24 m/s à Liège pour une période de retour de 50 ans.

Parallèlement, des essais en soufflerie ont été réalisés.

Ils ont permis de :

- Déterminer le profil du vent au droit de la gare en prenant en compte tout son environnement (le milieu urbain et la proximité immédiate de la colline) ;
- Mesurer la distribution des pressions au cours du temps sur toute la surface de la toiture ;
- Vérifier le comportement structurel, statique et dynamique de la toiture sous l'effet du vent ;
- Vérifier les critères de confort des voyageurs à l'intérieur de la gare.

### FRÉQUENCES ET MODES PROPRES

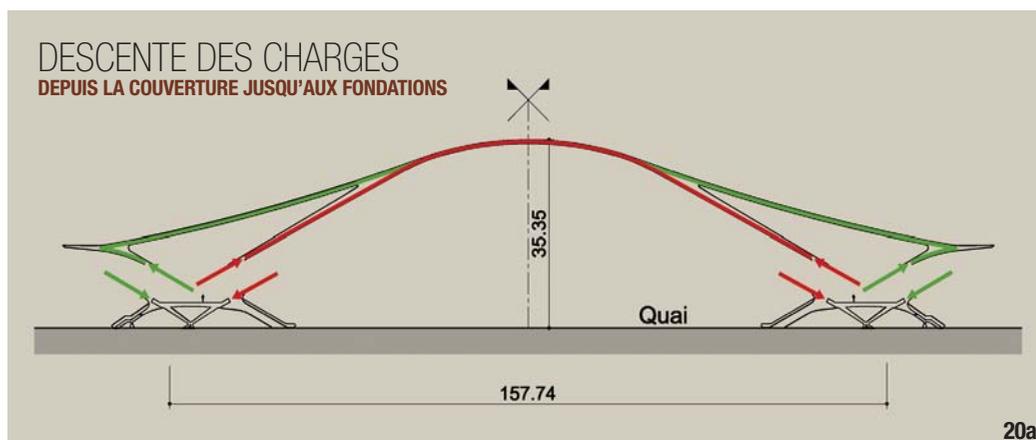
Pour des structures d'une telle portée, la valeur des fréquences propres de vibration et leur mode propre associé donnent des informations intéressantes sur le comportement d'ensemble, et en particulier : la fréquence sur la raideur et la sensibilité aux effets des rafales de vent ; ses modes de vibrations sur son schéma statique et sa sensibilité à des chargements symétriques et/ou dissymétriques.

L'examen du tableau 1 et du dessin des modes permet de tirer plusieurs enseignements :

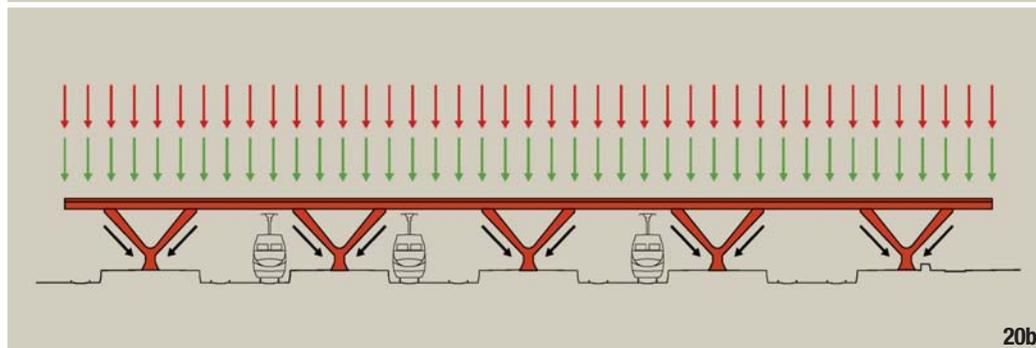
- Les modes de vibration mettent bien en évidence les modes de déformation prépondérants de la toiture : un balancement transversal de la structure induit par les auvents, une flexion verticale et dissymétrique des auvents par rapport à la toiture principale, la grande rigidité des passerelles qui servent d'appuis aux arcs ;

TABLEAU 1 : PREMIÈRES FRÉQUENCES ET MODES PROPRES DE VIBRATION

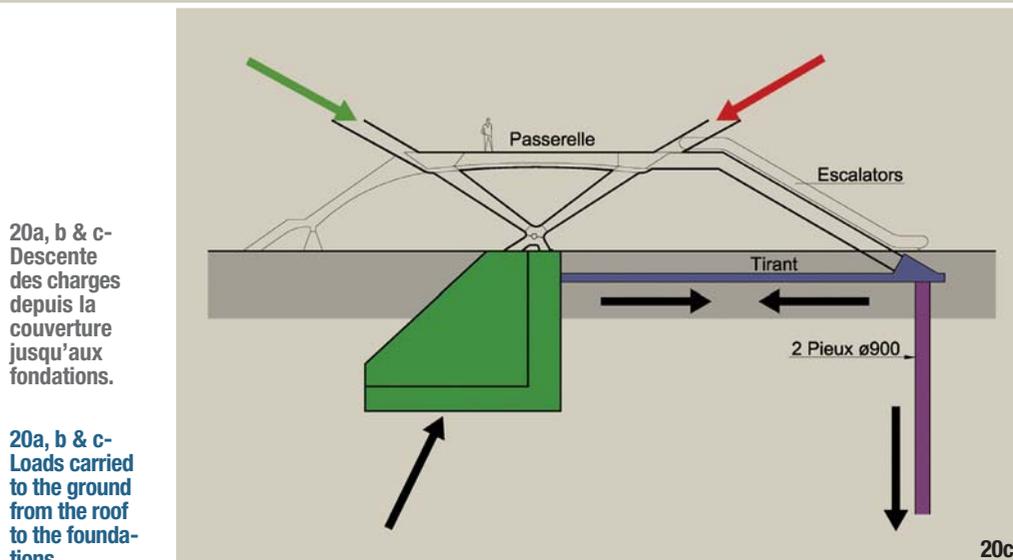
N° mode	Fréquence propre	Masse généralisée	Mode		
	Hz		Tonnes	Type de comportement	Géométrie du mode
1	0.36	2 419	Flexion transversale	Balancement	Auvent colline et ville
2	0.42	2 079	Flexion verticale	Dissymétrique	Auvent colline et ville
3	0.44	343	Flexion verticale	Symétrique	Auvent ville
4	0.45	85 503	Flexion verticale	Symétrique	2 auvents et toiture principale
5	0.46	1 333	Flexion verticale	Dissymétrique	Auvent colline et ville
6	0.48	87 041	Flexion verticale	Dissymétrique	Toiture principale et 2 auvents
7	0.48	104 868	Flexion verticale	Symétrique	Toiture principale et 2 auvents
8	0.54	28 611	Flexion transversale	Balancement	Structure complète
9	0.54	234 614	Flexion transversale	Balancement	Structure complète
10	0.55	1 998	Flexion verticale	Dissymétrique	Toiture principale



20a



20b



20a, b & c-  
Descente des charges depuis la couverture jusqu'aux fondations.

20a, b & c-  
Loads carried to the ground from the roof to the foundations.

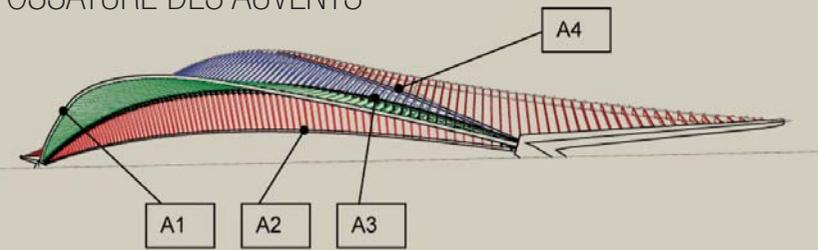
20c



© photo-dnlight.com

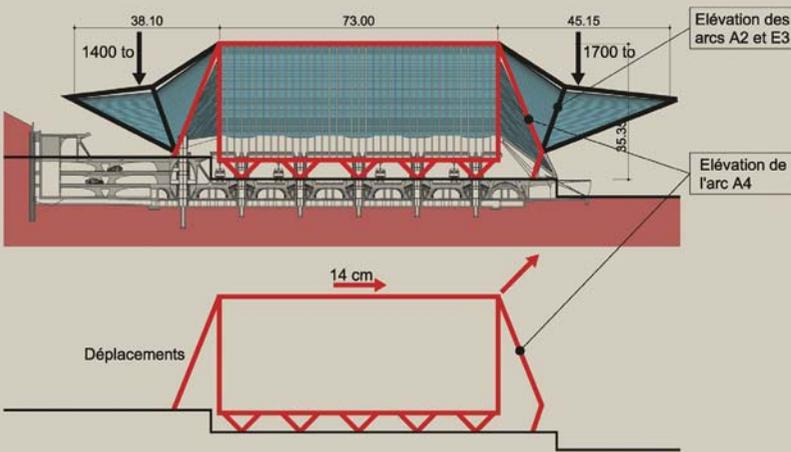
21

## OSSATURE DES AUVENTS



22

## SCHÉMA STATIQUE TRANSVERSAL DE LA TOITURE



23

**21- Auvent et éclairage.**  
**22- Ossature des auvents.**  
**23- Schéma statique transversal de la toiture.**

**21- Canopy and lighting.**  
**22- Framework of canopies.**  
**23- Static transverse diagram of the roof.**

→ Les contraintes calculées sont nettement enveloppes de celles mesurées ;  
 → Les distributions symétriques de surpressions, proposées par les normes, ne sont pas significatives ;  
 → Les contraintes mesurées au niveau des auvents ne peuvent être approchées qu'avec des distributions de dépressions sur les mêmes auvents ;  
 → La distribution des contraintes sur la toiture principale semble être mieux approchée pour un vent longitudinal et une distribution dissymétrique de pression. La distribution proposée par les normes est cependant surestimée d'un facteur de l'ordre de 1,30. Il est probable qu'adopter de tels coefficients de dépressions sur des surfaces aussi importantes est trop défavorable.

Les mesures ont mis en évidence quelques zones pour lesquelles les contraintes sont nettement plus faibles que celles fournies par les essais. Il s'agit d'éléments situés sur les auvents et dans les arcs auxquels sont accrochés ces mêmes auvents. Il a dès lors été nécessaire de vérifier à nouveau ces sections. Il s'est avéré que la sécurité était toujours garantie (figure 25).

→ Les premières fréquences sont relativement basses. Cela doit attirer l'attention sur le fait que la structure pourrait être sensible aux rafales de vent dont l'énergie est effectivement importante pour ce type de fréquences ;  
 → Certains modes ont des masses généralisées faibles vis-à-vis de la masse totale de la toiture, qui est de

l'ordre de 12 000 t. Cet indicateur montre que ces modes de vibration concernent seulement une partie de la toiture et/ou que la toiture sera d'autant plus facile à exciter par le vent ;  
 → Les fréquences des différents modes sont très proches les unes des autres. Cela est dû aux deux plans de quasi-symétrie de la structure. Chaque

mode dissymétrique est dédoublé en un mode symétrique et un autre dissymétrique (figures 24a à 24d).

### RÉSULTATS DES ESSAIS EN SOUFFLERIE

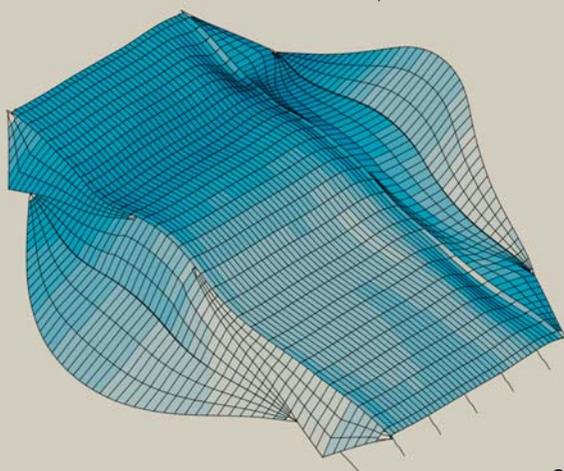
L'examen des résultats déduits des essais en soufflerie a permis de tirer les conclusions suivantes :

### CONSTRUIRE UNE NOUVELLE GARE DANS LA GARE

Outre les missions classiques d'avant-projet et de projet, le dossier a nécessité des études de phasage des travaux particulièrement pointues, menées en parallèle avec l'étude de faisabilité. Il fallait en effet relever de multiples défis particulièrement passionnants pour organiser les travaux sur le site de l'ancienne gare en exploitation. ▷

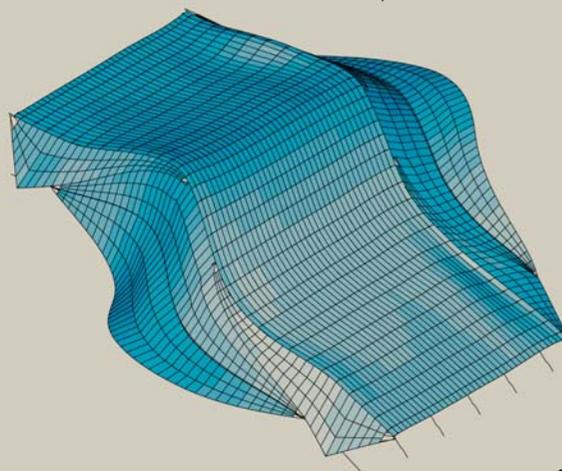
## QUELQUES MODES DE VIBRATION

MODE 1 – FRÉQUENCE = 0,36 HZ



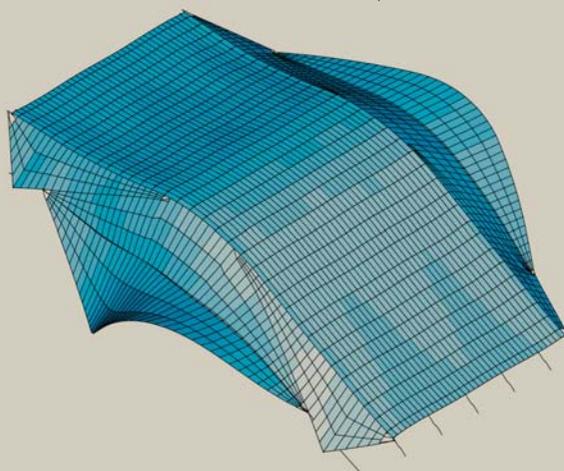
24a

MODE 2 – FRÉQUENCE = 0,42 HZ



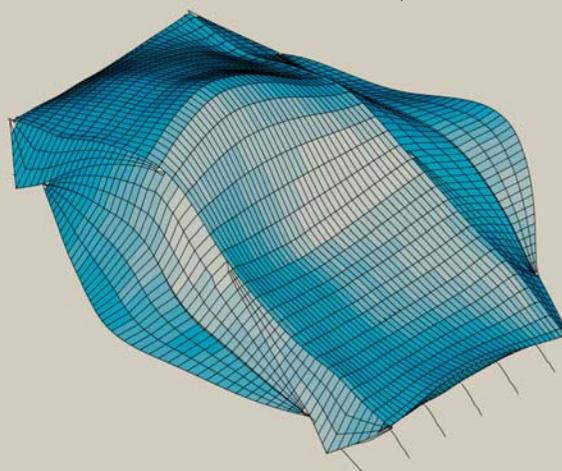
24b

MODE 3 – FRÉQUENCE = 0,44 HZ



24c

MODE 10 – FRÉQUENCE = 0,55 HZ



24d

24a à d-  
Quelques  
modes de  
vibration.

24a to d-  
Some  
vibration  
modes.

La présence de trains, de voyageurs, d'installations techniques comme la signalisation, les caténaires..., ont constitué autant d'éléments contraignants à maîtriser pour assurer la bonne exécution des opérations (photo 26). Les étapes de construction du bâtiment découlent du phasage des travaux de modernisation de l'infrastructure ferroviaire. Ainsi, le chantier de gros-œuvre béton comprend plusieurs phases :

- Construction des ouvrages d'infrastructure correspondant aux premiers quais, côté ville ;
- Passage d'une phase à une autre après mise en service des infrastructures ferroviaires sur les ouvrages nouvellement construits ;
- Construction du parking en deux temps afin de maintenir en service les voies situées côté colline (photo 27) : premier temps, construction du parking sur une demi-largeur adossée à la

colline ; second temps, construction de l'autre demi-largeur, dont la liaison parking-gare. Lors de l'appel d'offre initial, il était prévu d'installer la toiture en faisant appel à des moyens de levage de forte capacité, en travaillant par-dessus des voies de chemin de fer mises hors service pendant quelques heures de la nuit. Cela nécessitait un phasage très serré et fort contraignant pour les entreprises. Cette première offre fut déclarée infructueuse suite au dépassement beaucoup trop important du budget. Un second appel d'offre fut lancé. Pour limiter au maximum les inconvénients majeurs du travail au-dessus de la gare en fonctionnement, le bureau Greisch a proposé au maître d'ouvrage de mettre en place par poussage le corps central de la charpente, c'est-à-dire la partie couvrant les voies. Les auvents avant et arrière étaient montés en place avec des moyens classiques de manutention.

### POUSSAGE DE LA PARTIE CENTRALE DE LA TOITURE

Conçue et développée par le bureau Greisch, la technique de poussage des arcs principaux du corps central présentait plusieurs avantages : assemblage de l'intégralité de la structure métallique en dehors du domaine ferroviaire, pas de déplacement des engins de manutention en fonction de l'avancement du chantier, gain de temps important pour la mise en place de la structure métallique.

Pour la toiture de la gare, il a été proposé de pousser l'ensemble des arcs principaux du corps central et les deux passerelles (figures 28a à 28f et photos 29a à 29d) :

- Les passerelles, sur lesquelles s'appuient les arcs, font office de poutres de lançage ;
- Des palées provisoires disposées sur les quais remplacent temporairement

les quadripodes et servent d'appuis de lançage ;

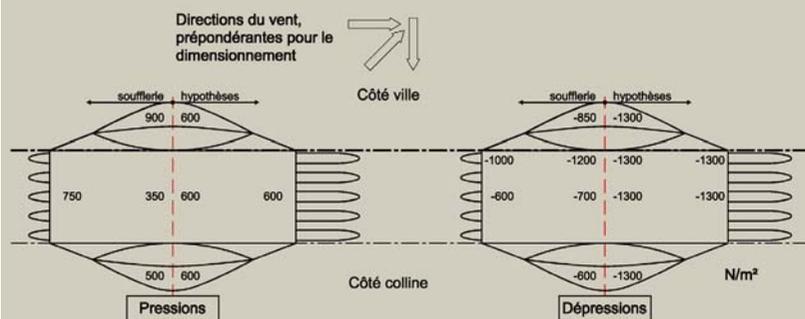
- Des patins spéciaux placés entre le sommet des palées provisoires et l'intrados des passerelles permettent d'assurer le glissement pendant le mouvement.

En service, les arcs exercent sur les passerelles une poussée transversale reprise par les fondations. Pendant le poussage, le système d'appuis de glissement sur palées provisoires étant incapable de reprendre la composante horizontale des efforts des arcs, cette poussée horizontale est équilibrée par des câbles en torons de précontrainte tendus entre les deux naissances d'arcs. Les séquences de construction étaient les suivantes :

- Réalisation d'une plate-forme d'assemblage devant la gare et mise en place des palées provisoires métalliques sur les quais ;

## SURPRESSIONS ET DÉPRESSIONS

COMPARAISON ENTRE MESURES ET NORMES



25



26



27

**25- Surpressions et dépressions – comparaison entre mesures et normes.**

**26- Vue pendant la construction.**

**27- Construction simultanée de la toiture de l'infrastructure.**

**25- Overpressures and negative pressures – comparison between measurements and standards.**

**26- View during construction.**

**27- Simultaneous construction of the infrastructure roof.**

→ Tous les deux mois et à sept reprises, les opérations suivantes ont été effectuées :

**1-** assemblage par soudage, sur la plateforme de montage, de cinq arcs, de leurs pannes de toiture et de deux éléments des passerelles d'une longueur d'environ 10 m ;

**2-** solidarisation de cet ensemble de 10 m à la partie de la toiture déjà en place avancée ;

**3-** mise en tension de deux câbles 8T15 horizontaux avec un effort de l'ordre de 100 t pour reprendre la poussée des cinq nouveaux arcs ;

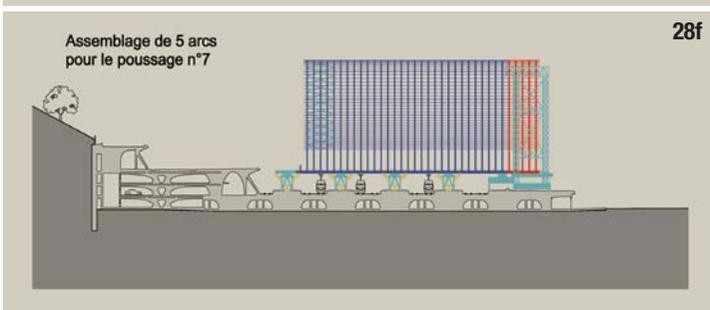
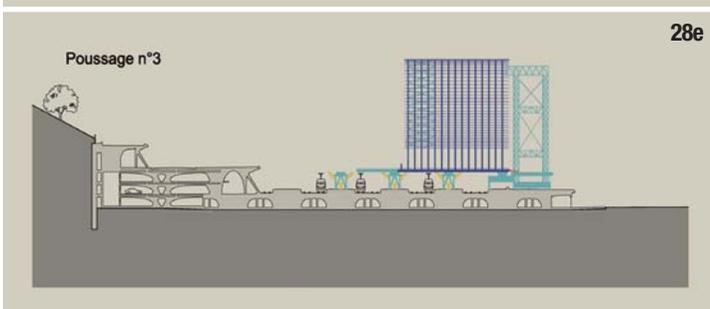
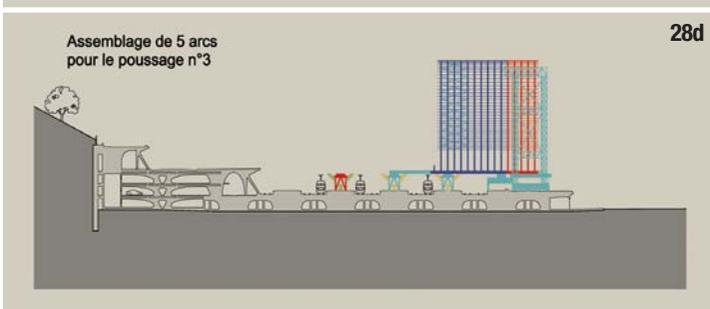
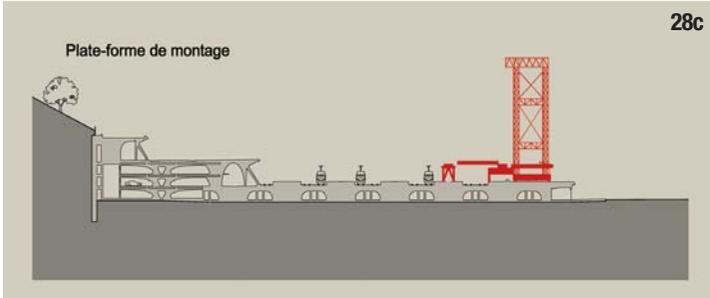
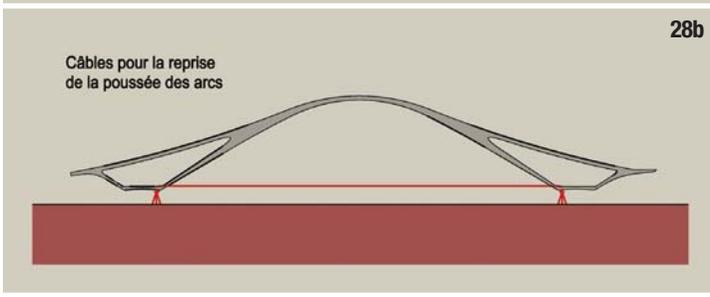
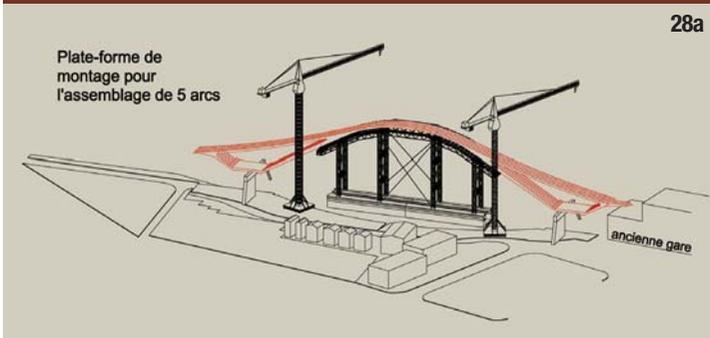
**4-** abaissement de la plate-forme de montage des cinq arcs et dépose de la structure sur les appuis de glissement ;

**5-** poussage de l'ensemble de la toiture déjà assemblée sur une distance de 10 m grâce aux deux vérins hydrauliques placés à l'arrière de la structure à déplacer (photo 30).

Les 35 arcs centraux, leurs pannes et les deux passerelles ont ainsi été mis en place en une année sans aucune manutention au-dessus de l'ancienne gare toujours en fonctionnement.

Alors que le premier lancement avait lieu fin mai 2005, la dernière opération s'est terminée le 8 juin 2006. ▷

## POUSSAGE DE LA PARTIE CENTRALE DE LA TOITURE





**28a à f & 29a à d-  
Poussage de la  
partie centrale  
de la toiture.**

**30- Poussage  
des arcs.**

**31- Construction  
des auvents.**

**28a to f & 29a to d-  
Pushing the central  
part of the roof.**

**30- Pushing arches.**

**31- Construction  
of canopies.**

Pour avancer de 10 m à une hauteur de 6 m au-dessus des voies, deux nuits étaient nécessaires.

La structure de 5 000 t était mise en mouvement en période nocturne, à la demande de la société belge de chemins de fers qui imposait, par sécurité, la coupure de la haute tension sur les caténaies.

Les vérins de poussée, un à l'extrémité de chaque passerelle, exerçaient l'effort de poussage, de l'ordre de 250 t pour la dernière opération.

Sur les 39 arcs de la partie centrale de la toiture, 35 ont été mis en place par lançage.

Les quatre derniers ont été assemblés par la suite sur des tours d'étalement classiques, en même temps que la mise en place des auvents (photo 31). Ces derniers, qui assurent la stabilité transversale du dôme et dont la dissymétrie provoque un déplacement du sommet de la toiture, ont été décintrés simultanément pour éviter de compromettre la stabilité de l'ensemble. □

## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

**COUVERTURE DES QUAIS : plus de 400 m**

**HAUTEUR DE LA TOITURE AU-DESSUS DU NIVEAU DE LA PLACE : 40 m**

**LONGUEUR EN FAÇADE DE LA TOITURE PRINCIPALE : 200 m**

**POIDS DE LA SUPERSTRUCTURE EN ACIER : plus de 10 000 t**

**INFRASTRUCTURE EN BÉTON : 65 000 m<sup>3</sup>**

**SURFACE VITRÉE : 30 000 m<sup>2</sup>**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Société nationale des chemins de fer belges**

**MAÎTRE D'ŒUVRE : Euro Liège TGV**

**ARCHITECTE : Santiago Calatrava SA**

**INGÉNIEURS STABILITÉ/ASSISTANCE À LA MAÎTRISE D'ŒUVRE : bureau d'études Greisch**

**CONTRÔLE TECHNIQUE : Seco**

**INFRASTRUCTURE BÉTON ET FERROVIAIRE : association momentanée Galère-Duchêne-WUST-CFE**

**CHARPENTE MÉTALLIQUE : Elaborados metalicos SA**

**COUVERTURE VITRÉE : association momentanée Portal-Laubeuf**

### ABSTRACT

#### THE NEW HIGH-SPEED TRAIN STATION OF GUILLEMINS IN LIÈGE

GREISCH : JEAN-MARIE CRÉMER - VINCENT DE VILLE DE GOYET - CLÉMENT COUNASSE - YVES DUCHÊNE - VÉRONIQUE FAGNOUL

The new high-speed train station in Liège is a very slender, large-scale structure. A monumental dome of glass and steel 200 m long, flanked by two impressive side canopies, covers the tracks, the platforms and the travel centre. Five longitudinal structures extend this main dome to form platform shelters. Construction of the station, a real technical challenge, was complicated by the need to build the new infrastructure while the old structure was still in operation. For engineering and construction, therefore, a great variety of high-level competencies had to be deployed in order to perfectly master the behaviour of the structures and cope with the numerous construction difficulties. □

#### LA NUEVA ESTACIÓN TGV DE LES GUILLEMINS EN LIÈGE

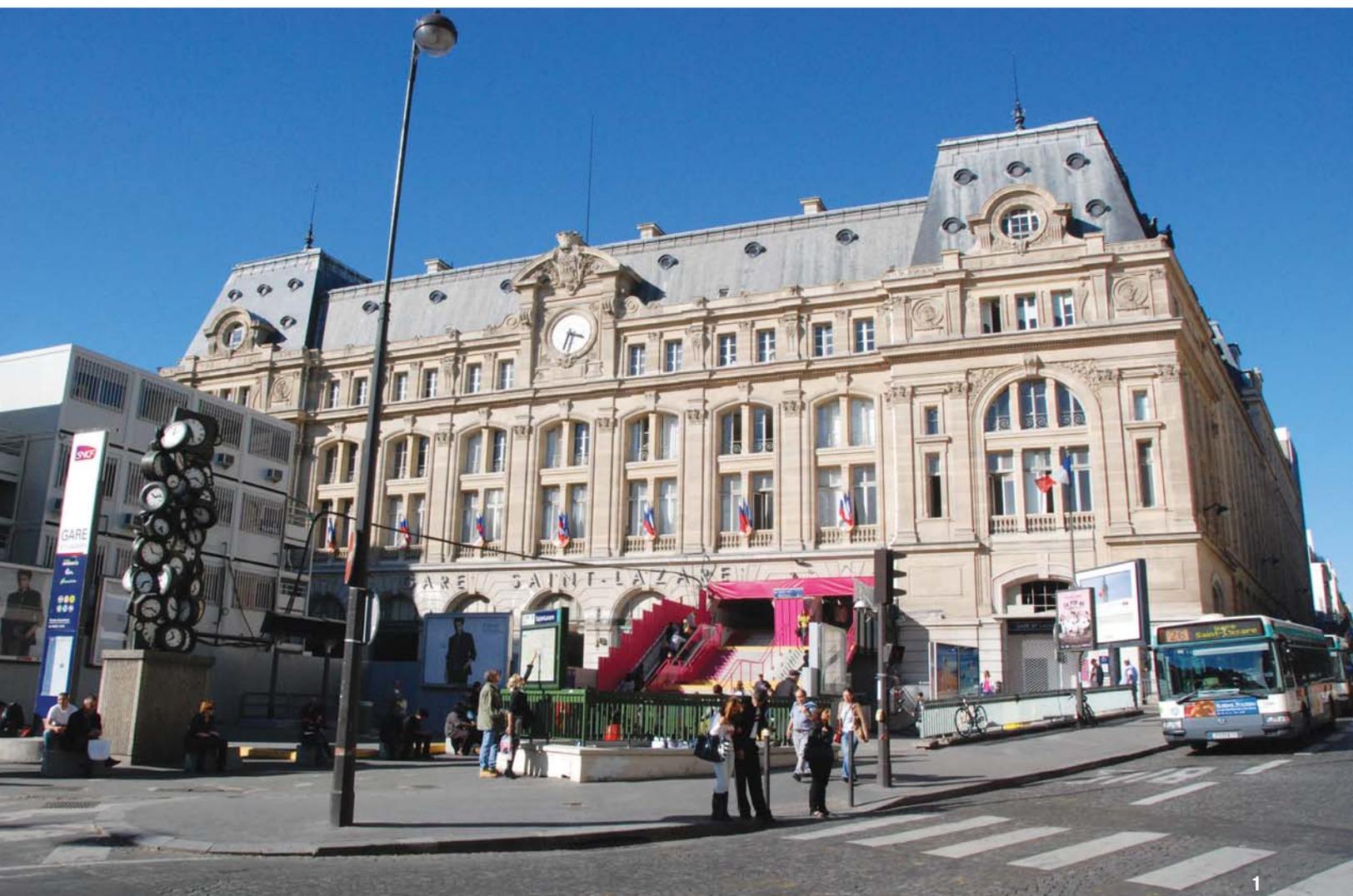
GREISCH : JEAN-MARIE CRÉMER - VINCENT DE VILLE DE GOYET - CLÉMENT COUNASSE - YVES DUCHÊNE - VÉRONIQUE FAGNOUL

La nueva estación TGV de Liège es una estructura de gran dimensión y de una gran esbeltez. Una monumental cúpula de vidrio y acero de una longitud de 200 metros, flanqueado de dos impresionantes cobertizos laterales, cubre los carriles, los andenes y el centro de viaje. Cinco estructuras longitudinales prolongan esta cúpula principal para constituir las protecciones de andenes. La construcción de la estación, verdadero reto técnico, se ha complicado debido a la necesidad de construir la nueva infraestructura mientras seguía en servicio la antigua estructura. Por consiguiente, los estudios y la realización han precisado la movilización de competencias sumamente diversas y punteras con objeto de controlar perfectamente el comportamiento de las estructuras y hacer frente a las numerosas dificultades de ejecución. □

# GARE DE PARIS SAINT-LAZARE : UNE MUTATION AMBITIEUSE

AUTEUR : BERTRAND CAHEN, CHEF DE GROUPE, SPIE SCGPM

LE TROISIÈME ET AVANT-DERNIER VOILET DE RESTRUCTURATION ET RÉNOVATION EN PROFONDEUR DE LA GARE SAINT-LAZARE A DÉBUTÉ EN JANVIER 2009 AVEC LE PROJET « CŒUR ST-LAZARE » ET S'ACHÈVERA EN 2012. IL PARTICIPE À LA MÉTAMORPHOSE DE CE LIEU EMBLÉMATIQUE DE LA CAPITALE, QUI CONNAÎTRA UNE NOUVELLE MODERNITÉ, CONJUGUANT CONFORT, FONCTIONNALITÉ, ACCESSIBILITÉ ET INTERMODALITÉ.



PHOTOS 1 & 2 © DR

À la suite de la rénovation du quai transversal, de la construction de l'entrée rue d'Amsterdam et d'un nouvel espace de vente grandes lignes, le chantier débuté en 2009 entre ainsi dans sa phase la plus complexe qui concerne la restructuration totale du cœur de la gare, la célèbre « salle des pas perdus », dont

l'ossature est conservée et reprise en sous-œuvre pour créer trois niveaux supplémentaires (métro et parking). Le chantier de rénovation de la gare Saint-Lazare est un projet d'exception. Aux côtés de la SNCF, deux partenaires experts, Spie batignolles, promoteur et constructeur, et Klépierre avec sa filiale Ségécé, respectivement investisseur

**1- La gare St-Lazare :**  
450 000 voyageurs/jour,  
1 500 trains/jour.

**1- St-Lazare station:**  
450,000 travellers  
per day, 1,500 trains  
per day.

et concepteur du nouvel espace commercial de 10 000 m<sup>2</sup> de la gare, y déploient leur savoir-faire. De son côté, Spie SCGPM, l'entreprise générale adjudicataire du marché, met en œuvre des techniques inédites pour réaliser, dans un bâtiment construit au 19<sup>e</sup> siècle, un chantier de rénovation particulièrement ambitieux.

## LA GARE SAINT-LAZARE EN CHIFFRES

**450 000** voyageurs par jour  
**1 500** trains Transilien par jour  
**100** trains Corail Intercités et TER par jours  
**27** lignes de bus  
**6** lignes de métro et RER  
**4** bornes Vélib  
**250** places de parking souterrain sur deux niveaux

2- La «salle des pas perdus» en cours de restructuration.

3 & 4- Coupes-types de la gare avant et après les travaux.

4bis- Coupe-type du volume à excaver dans la «salle des pas perdus».

2- The «salle des pas perdus» hall undergoing restructuring.

3 & 4- Typical cross sections of the station before and after the works.

4bis- Typical cross section of the volume to be excavated in «salle des pas perdus» hall.

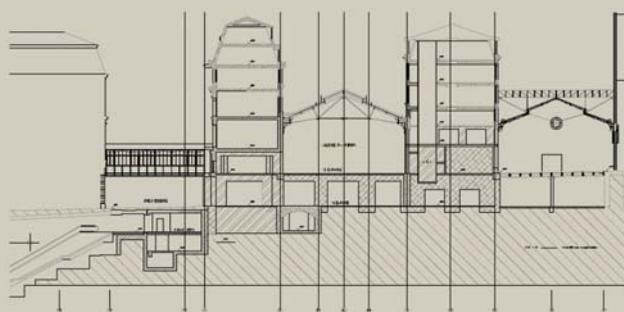
## UNE GARE EN MUTATION PROFONDE

Première gare française édiflée en 1837, la gare de Paris Saint-Lazare, d'inspiration classique, se trouve au cœur du plus grand quartier marchand de la capitale. Deuxième gare d'Europe au niveau des flux de voyageurs, son activité principale est liée aux déplacements quotidiens de la clientèle d'Ile-de-France et de Normandie.

Depuis 1970, cette gare n'avait connu aucune rénovation importante et ne répondait plus à la qualité de services et d'accueil attendue dans une gare parisienne. Le projet de restructuration vise à redonner de la cohérence, de l'ampleur et de la clarté aux espaces dévolus au public.

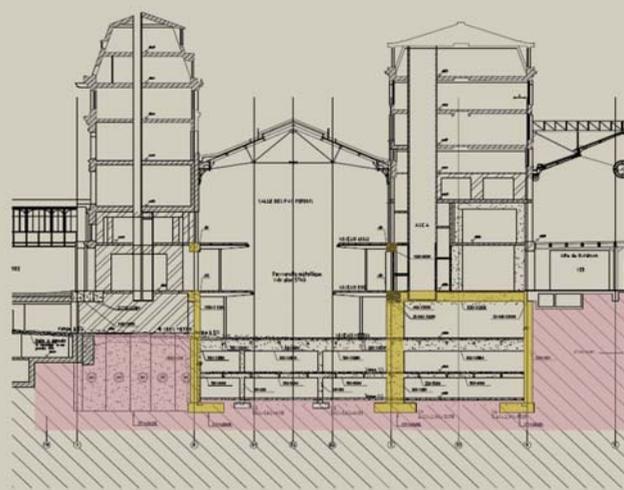


## COUPES-TYPES DE LA GARE AVANT LES TRAVAUX



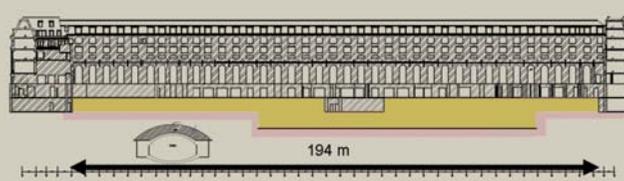
3

## COUPES-TYPES DE LA GARE APRÈS LES TRAVAUX



4

## COUPE-TYPE DU VOLUME À EXCAVER DANS LA «SALLE DES PAS PERDUS»



4bis

SCHÉMAS 3, 4 & 4BIS © SOMETE

En effet, depuis la construction de la gare, de nombreux transports urbains – bus, métros, RER – sont progressivement venus se connecter au bâtiment historique par des cheminements souvent peu lisibles, peu confortables et, aujourd'hui, sous-dimensionnés.

Dans le cadre des travaux actuels, un vaste hall est créé au droit de l'ancienne «salle des pas perdus» pour relier le niveau du métro, le niveau rue et le niveau des quais. Il accueillera tous les cheminements entre le train, la ville et ses transports, dans un lieu baigné de lumière naturelle où chacun pourra trouver sur son trajet, du matin au soir, commerces, services et informations de la vie quotidienne.

Dans ce lieu historique, va ainsi naître un espace emblématique de la ville d'aujourd'hui, au cœur de l'un des quartiers les plus animés de Paris.

## UN ENVIRONNEMENT IMMÉDIAT SENSIBLE

Le chantier se déroule dans un environnement urbain très dense, en surface et en souterrain et donc dans des conditions complexes.

Le bâtiment est partiellement inscrit à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques. Les voisinages sont sensibles : une station de métro et le tunnel de la ligne 14 sous l'emprise ouest de la gare, des stations et des couloirs de métro sous les cours de la gare, 27 voies ferrées mitoyennes au nord. Entourant la gare, s'ajoutent des voies urbaines encombrées, des stations de bus, un quartier d'affaires et commercial mondialement connu, une fréquentation touristique abondante et un hôtel 4 étoiles : le Concorde Opéra Paris.

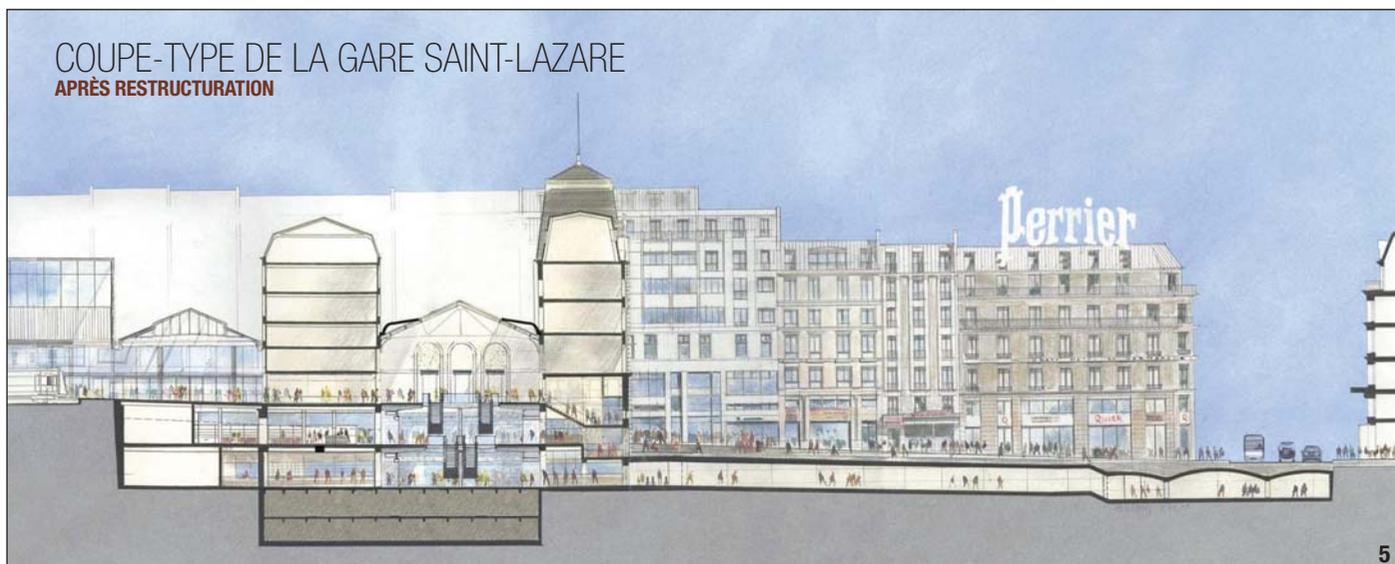
Le défi le plus difficile du projet Cœur St-Lazare est sans aucun doute de mener à bien en moins de trois ans ce grand chantier parisien sans cessation de l'activité de la gare, en maintenant intégralement les alimentations en eau et en énergie nécessaires à son exploitation et à son administration quotidienne.

Dans un premier temps, plusieurs aménagements ont été réalisés pour les voyageurs en 2009 :

→ Nouveaux accès pour rejoindre le métro et le RER ;

→ Mise en service de trois passages pour la circulation des voyageurs ayant pour but de simplifier cette dernière, de sécuriser les cheminements en isolant le chantier et de permettre la remise en service des escaliers mécaniques ;

→ Ouverture de la nouvelle entrée rue de Rome.



5

© SNCF DAAB, DGLA

Les années 2010 et 2011 seront consacrées à l'aménagement intérieur de la gare, en particulier de la nouvelle « salle des pas perdus ».

#### DÉFIS TECHNIQUES

Le chantier proprement dit devait s'affranchir de quatre contraintes majeures :

- Des travaux de creusement en sous-cœuvre profond, à près de 15 mètres ;
- La longueur de 213 mètres du bâtiment existant, construit en maçonnerie et en charpente métallique réalisée sans joint de dilatation ;
- Des corps de bâtiment articulés autour de la verrière du 19<sup>e</sup> siècle qui ne doit pas être fragilisée pendant les travaux ;
- Une accumulation de techniques très variées sur un seul chantier.

La future structure de la « salle des pas perdus » est réalisée essentiellement en sous-cœuvre.

Le premier défi consistait à creuser et construire les nouvelles structures sans faire bouger l'existant.

Avant d'excaver un volume de terre de 70 000 m<sup>3</sup> sous le bâtiment existant (sur une largeur de 33 mètres, une profondeur de 6 à 15 mètres et une longueur de 194 mètres), il était nécessaire de mettre en place des éléments porteurs dans des puits blindés jusqu'à 14 m de profondeur au fond desquels sont réalisées des semelles de 2,50 m x 2,50 m en moyenne qui supportent de nouveaux poteaux principaux tous les 10 mètres. Au total, ce sont 240 puits qui sont ainsi excavés. Pour éviter des désordres structurels

**5- Coupe-type de la gare Saint-Lazare après restructuration, notamment avec les niveaux de parkings nouvellement créés.**

**6- Les trois niveaux de la nouvelle « salle des pas perdus » avec ses deux niveaux supplémentaires de commerces.**

**5- Typical cross section of Saint-Lazare station after restructuring, in particular with the newly created car park levels.**

**6- The three levels of the new «salle des pas perdus» hall with its two additional levels of shops.**

#### LES CHIFFRES-CLÉS DE L'OPÉRATION DE RÉNOVATION

**37 000 m<sup>2</sup> d'espaces publics et commerciaux**

**10 000 m<sup>2</sup> de surfaces commerciales**

**80 commerces nouveaux dont 3 moyennes surfaces**

**3 niveaux en sous-cœuvre dont 2 de parking**

**2 500 passagers/minute dans la gare pendant la durée des travaux**

#### LES TROIS NIVEAUX DE LA NOUVELLE « SALLE DES PAS PERDUS »

**AVEC SES DEUX NIVEAUX SUPPLÉMENTAIRES DE COMMERCES**



6

© SNCF DAAB, DGLA

## LES CHIFFRES-CLÉS DU CHANTIER

**120 millions d'euros HT**  
dont 48 millions d'euros  
pour le gros œuvre

**600 000 heures de travaux**  
tous corps d'état

**240 puits blindés**

**70 000 m<sup>3</sup> de déblais**

**12 000 m<sup>3</sup> de béton**

**2 500 tonnes d'armatures  
d'acier**

**300 tonnes de charpente  
métallique**

7- Les tabourets métalliques provisoires de soutien des éléments porteurs existants.

8- L'existant est démolit dans la hauteur de la future poutre.

9- Les travaux de terrassement sont réalisés par des matériels lourds.

10- Dans les endroits exigus, les travaux d'excavation sont assurés par des matériels compacts : ici, une mini-pelle de 2,5 t.

11- Trois passages sécurisés pour la circulation des voyageurs ont été aménagés.

7- The temporary metal stools supporting the existing loadbearing elements.

8- The existing structure is demolished at the height of the future beam.

9- Earthworks are performed by heavy equipment.

10- In confined places, the excavation works are performed by compact equipment: here, a 2.5-tonne mini-shovel.

11- Three secure passageways were arranged for passenger traffic.



du bâtiment ancien quand il reposera sur les nouvelles installations, il est posé provisoirement sur des vérins, qui permettent à la future structure de récupérer l'intégralité des charges de l'existant.

### PLUSIEURS ÉTAPES SIMULTANÉES ET SUCCESSIVES

La reprise en sous-œuvre des maçonneries existantes se déroule en plusieurs étapes menées parallèlement. Des ouvertures sont ménagées de part et d'autre de chaque axe des piles en maçonnerie pour y installer deux « tabourets », c'est-à-dire des pièces structurales en acier. Mis en place les uns après les autres, ces tabourets équipés de vérins hydrauliques, se substituent totalement à chaque pile. Ils reprennent ainsi la totalité de leur charge descendante, ce qui permet de démolir la maçonnerie restante, devenue structurellement inutile, sur la hauteur de la future poutre.

Une poutre de reprise sans joints de dilatation, à l'intérieur de laquelle les tabourets sont noyés dans la masse de béton est alors coulée sur toute la longueur de la « salle des pas perdus » par tronçons de 30 m. De plus, une poutre sur deux est équipée de vérins en vis-à-vis de ceux installés sur les tabourets. Il fallait trouver une solution pour que les deux nouvelles poutres principales ne soient pas fragilisées par le retrait du béton après coulage, de l'ordre de 5 à 6 cm, sur la longueur totale de 194 mètres. L'entreprise a donc créé des joints artificiels destinés à concentrer les fissures de retrait.

Par ailleurs, les poutres sont coulées par tronçons successifs avec création de zones de clavetage différées entre chacun d'eux, qui ne sont coulées qu'au bout de 100 jours pour laisser ▷

aux parties déjà construites le temps d'effectuer la majorité de leur retrait. Les nouveaux poteaux définitifs peuvent alors être coulés sous les poutres non équipées de vérins grâce à un étaie-ment provisoire. Les vérins en place sont mis en pression pour transmettre une charge équivalente à celle que soutiendra la poutre afin de lui donner sa flèche définitive pour empêcher tout mouvement ultérieur. Il ne reste plus qu'à démolir les maçonneries existantes.

### PRÉSERVER L'EXISTANT

La deuxième grande difficulté était de préserver l'intégrité d'une gare existante, monobloc, sans joint de dilatation. L'infrastructure en sous-cœvre de près de 200 mètres de longueur est construite en béton armé. Ce matériau monolithique nécessiterait normalement des joints de dilatation et de retrait dans la structure actuelle qui n'en comporte pas. Spie batignolles a fait le choix de ne pas créer de joints de dilatation mais une quantité importante d'amorces de joints pour guider les fissures et les répartir afin de les rendre acceptables. Le contrôle du mouvement des ouvrages constituait le troisième impératif. En effet, il était indispensable de les contrôler soigneusement, notamment en ce qui concerne leur tassement, ainsi que les déformations de la verrière supérieure en bois et acier, elle aussi en cours de rénovation.

### CONJUGAISON DE TECHNIQUES

L'utilisation sur un seul chantier d'une grande variété de techniques représentait un défi supplémentaire pour Spie SCGPM. Pour le relever, l'entreprise met donc en œuvre une large gamme de solutions qui ont déjà été évoquées précédemment :

- L'instrumentation des façades par des cordes optiques pour une connaissance en temps réel du comportement du bâtiment en 3D ;
- Des puits blindés et des poteaux porteurs en sous-cœvre ;
- La gestion des déformations et des déplacements à l'aide de vérins hydrauliques ;
- Des excavations avec stabilisation des parois à l'avancement par béton projeté en spirale continue ;
- La consolidation de certaines structures par butons inclinés ;
- La répartition des mouvements de dilatation sur les joints de maçonnerie et les assemblages de charpente ;
- Enfin, le coulage fragmenté du béton et des clavetages différés pour annuler les retraites.

## UNE OPÉRATION EXCEPTIONNELLE D'HÉLIPORTAGE

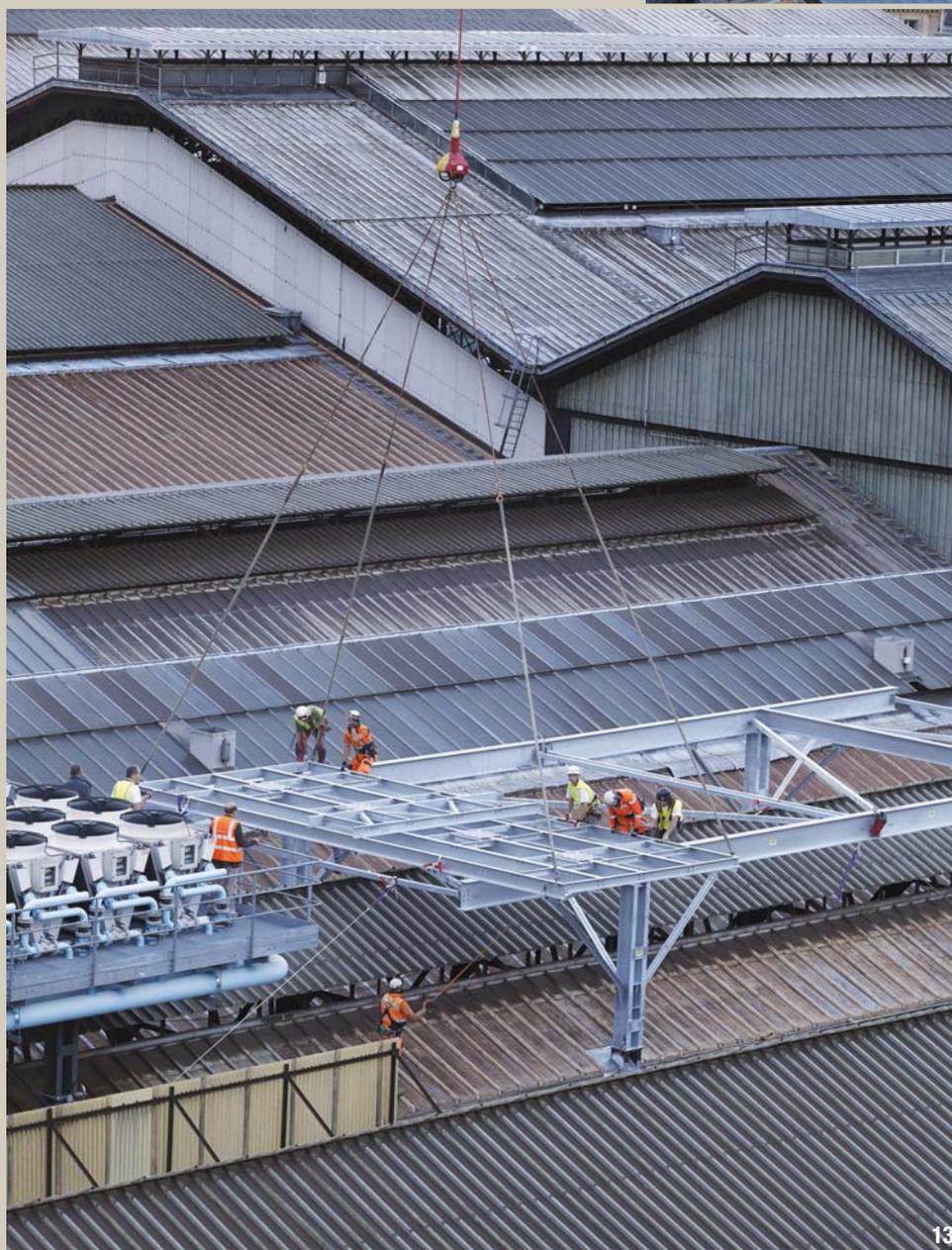
**Pour la livraison et l'installation des équipements pour la climatisation du futur espace commercial de Cœur St-Lazare, le groupe Spie batignolles a organisé, en août 2010, deux opérations d'héliportage exceptionnelles. Les trois groupes de climatisation (tours aéro-réfrigérantes à voie sèche ou « Dry Coolers ») et la plateforme sur laquelle ils reposent ont été installés au dessus de la verrière qui surplombe les quais et les voies ferrées de la gare Saint-Lazare.**

**Spie SCGPM, filiale de Spie batignolles, a opté pour une livraison et une installation par héliportage pour des raisons de sécurité et de contraintes d'accès dans un quartier urbain très dense.**

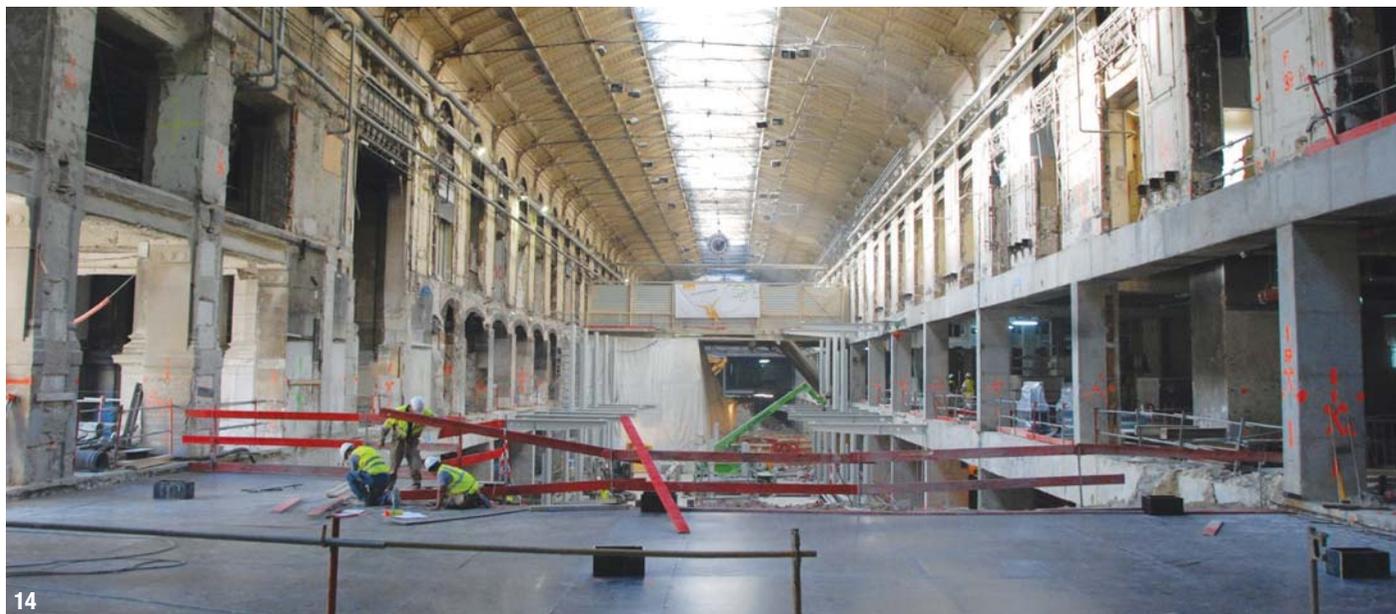
**Paris a ainsi été survolé sur une longueur de 1,5 km par un hélicoptère Super Puma bi-turbine qui a décollé à 8 reprises d'un terrain proche du pont Cardinet, dans le 17<sup>e</sup> arrondissement, avec une charge de 3 à 4 t, pour survoler à 500 m d'altitude les voies ferrées en direction de la gare St-Lazare. Il a fait ensuite un vol stationnaire à environ 60 m au dessus de la verrière, le temps de la pose de chacun des éléments.**



12



13



PHOTOS 12, 13 & 14 © DR

14

**12 & 13- L'opération d'héliportage pour la livraison et l'installation des groupes de climatisation.**

**14- La nouvelle configuration de la « salle des pas perdus » à l'achèvement des terrassements.**

**12 & 13- The helicopter transport operation for delivery and installation of the air conditioning units.**

**14- The new configuration of the «salle des perdus» hall upon completion of earthworks.**

La mise en œuvre conjointe de ces techniques variées a permis de gérer les nombreuses difficultés présentées par le chantier.

#### **UN ESPACE INTERMODAL OUVERT SUR LA VILLE**

La métamorphose de la gare Saint-Lazare va lui permettre de devenir un espace intermodal ouvert sur la ville. Ainsi, les vitrines que constituent les parvis vont devenir des lieux de passage et d'intermodalité, fluides, accessibles et pratiques. Le projet inclut donc une quatrième et dernière phase entièrement dédiée à la rénovation des parvis Rome et Havre ainsi qu'à la rue intérieure les reliant. De grandes baies vitrées dévoileront le cœur de la gare depuis le parvis, pour encore plus d'espace et de transparence. Point final du projet, la rénovation des parvis marquera l'achèvement des travaux du Cœur St-Lazare et annoncera la clôture du chantier.

Comme pour la gare du Nord, les parvis Havre et Rome seront totalement réaménagés pour fluidifier les circulations et rendre la gare plus accessible aux piétons et notamment aux personnes à mobilité réduite. Dix ans d'études auront été nécessaires, à partir d'un cahier des charges complexe, avant le démarrage du chantier.

Dix ans avec trois partenaires majeurs qui ont décidé de s'associer. Chacun a joué sa partition en travaillant avec des interlocuteurs de poids : la ville de Paris et la RATP. Cette phase préparatoire a finalement été bénéfique puisque le projet devenu aujourd'hui réalité constituera une référence remarquable pour tous ses acteurs. □

### LES ACTEURS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** SNCF, Soaval (Klépierre-Ségécé)  
**EXPLOITATION DE L'ESPACE COMMERCIAL :** Klépierre-Ségécé  
**PROMOTEUR :** Paris Cour de Rome (Spie Batignolles Immobilier)  
**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** SNCF DAAB, DGLa (architecture) ; Spie SCGPM (BET structures) ; Barbanel, Arep (BET fluides)  
**BUREAU DE CONTRÔLE :** Qualiconsult  
**CSPS :** Socotec  
**ENTREPRISE GÉNÉRALE :** Spie SCGPM  
**LIVRAISON :** Janvier 2012

#### ABSTRACT

### PARIS SAINT-LAZARE STATION: AN AMBITIOUS TRANSFORMATION

BERTRAND CAHEN, SPIE SCGPM

The third and second-to-last part of the structural re-engineering and radical renovation of Saint-Lazare station began in January 2009, with the «Cœur St-Lazare» project, and will be completed in 2012. It will contribute to the metamorphosis of this emblematic location in the capital, which will enjoy a new modernity, combining comfort, functionality, accessibility and intermodality. Following renovation of the transverse platform, the construction of the rue d'Amsterdam entrance and a new main line sales area, the project started in 2009 is accordingly entering its most complex phase involving, in particular, complete structural re-engineering of the heart of the station, the famous «salle des pas perdus» hall, whose frame has been preserved and underpinned to create three additional levels (metro and car park). □

### ESTACIÓN DE PARIS SAINT-LAZARE: UNA AMBICIOSA MUTACIÓN

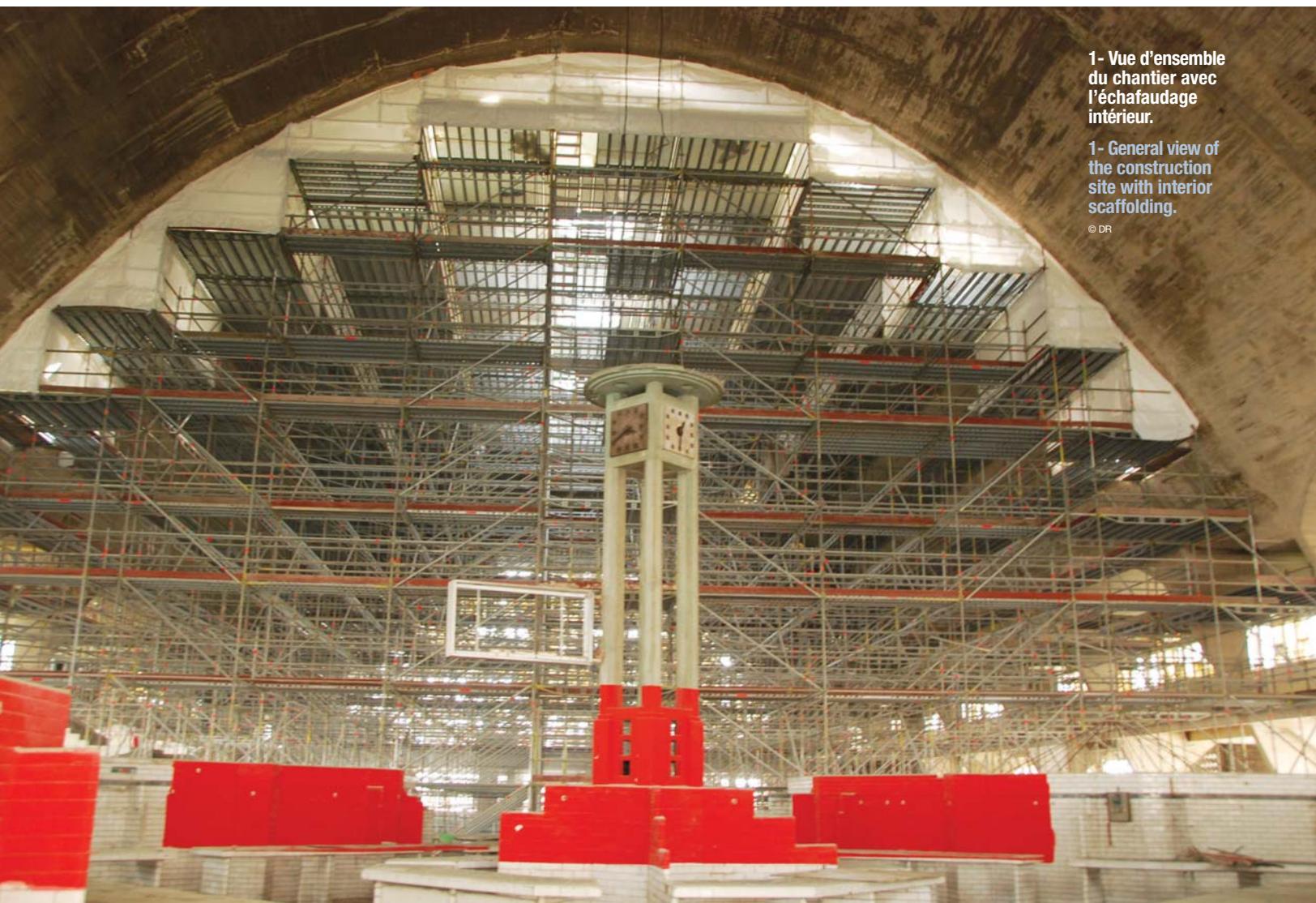
BERTRAND CAHEN, SPIE SCGPM

El tercer y antepenúltimo capítulo de reestructuración y renovación profunda de la estación Saint-Lazare se ha iniciado en enero de 2009, con el proyecto «Cœur St-Lazare» y finalizará en 2012. Este proyecto participa en la transformación de este lugar emblemático de la capital, que estará objeto de una nueva modernidad, que combinará confort, funcionalidad, accesibilidad e intermodalidad. A raíz de la renovación del andén transversal, de la construcción de la entrada en la calle Ámsterdam y de un nuevo espacio de venta grandes líneas, la obra iniciada en 2009 entra en su etapa más compleja que se refiere, fundamentalmente, a la reestructuración total de centro de la estación, la célebre «salle des pas perdus», cuya estructura se conserva y con obras en recalce para crear tres niveles suplementarios (metro y aparcamiento). □

# RÉNOVATION DES HALLES DU BOULINGRIN : LA MODERNITÉ COMME AU PREMIER JOUR

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

PROUESSE TECHNIQUE DE LA RECONSTRUCTION APRÈS LA GUERRE DE 14-18, LES HALLES DU BOULINGRIN À REIMS ONT ÉTÉ « CALCULÉES » PAR L'INGÉNIEUR EUGÈNE FREYSSINET QUI, DANS LEUR CONCEPTION, A POUSSÉ LE BÉTON ARMÉ À SES LIMITES TECHNIQUES. EN EFFET, LA VOÛTE TRÈS FINE DÉGAGE UN GRAND ESPACE SANS AUCUN APPUI, DE PLUS DE 40 M DE LARGEUR ET 20 M DE HAUTEUR. CLASSÉES MONUMENT HISTORIQUE EN 1990, ELLES SONT EN COURS DE RÉNOVATION ET RETROUVERONT, EN FÉVRIER 2012, LEUR VOCATION INITIALE DE MARCHÉ COUVERT, TOUT EN S'OUVRANT À D'AUTRES USAGES À VOCATION CULTURELLE.



1 - Vue d'ensemble  
du chantier avec  
l'échafaudage  
intérieur.

1 - General view of  
the construction  
site with interior  
scaffolding.

© DR

Décidée au lendemain de la destruction de la ville de Reims par les bombardements, la conception des Halles du Boulingrin a été confiée à l'architecte Emile Maigrot en 1923 ; mais la paternité de leur audace technique revient à Eugène Freyssinet, alors ingénieur de la société Limousin et Freyssinet, adjudicataire du lot de gros œuvre en 1926, pour laquelle il a développé plusieurs brevets, notamment celui des coques minces en béton armé.

Le bâtiment des Halles du Boulingrin en est une illustration remarquable, puisqu'il est constitué d'une voûte mince en béton armé, d'une épaisseur de seulement 5 cm, protégée par une chape de 2 cm. Haute de 20 m, la voûte présente une longueur de 112 m et une largeur de 49 m, constituant une structure spatiale de grandes dimensions, sans appuis intermédiaires. Elle est flanquée de grands pignons vitrés sur

**2- La façade des halles du Boulingrin à l'issue de la restauration.**

**3- La voûte en béton armé a une épaisseur de seulement 5 cm.**

**4- Structure de l'échafaudage intérieur.**

**2- The facade of Halles du Boulingrin on completion of restoration.**

**3- The reinforced concrete roof is only 5 cm thick.**

**4- Structure of interior scaffolding.**

les côtés et tendue par des tirants inclus dans les poutres qui soutiennent le plancher du rez-de-chaussée.

Démarré au début de l'année 1927, le chantier s'achèvera par une l'ouverture des halles au public en octobre 1929. L'édifice, qui résistera à la Seconde Guerre mondiale, est désaffecté en 1988 pour raisons de sécurité. Il est classé aux Monuments Historiques en 1990 alors qu'un projet de la ville de Reims visait à le détruire.

Dès 1996, des études sont menées afin de définir le futur de l'ouvrage tombé en décrépitude. À l'issue de différentes annonces contradictoires, c'est le projet architectural et technique (PAT) porté par l'architecte en chef des Monuments Historiques François Châtillon qui est adopté fin juin 2007.

Fin mai 2008, le nouveau maire annonce une ouverture prévue pour 2012. Le projet respectera l'aspect extérieur du bâtiment tout en le rajou-

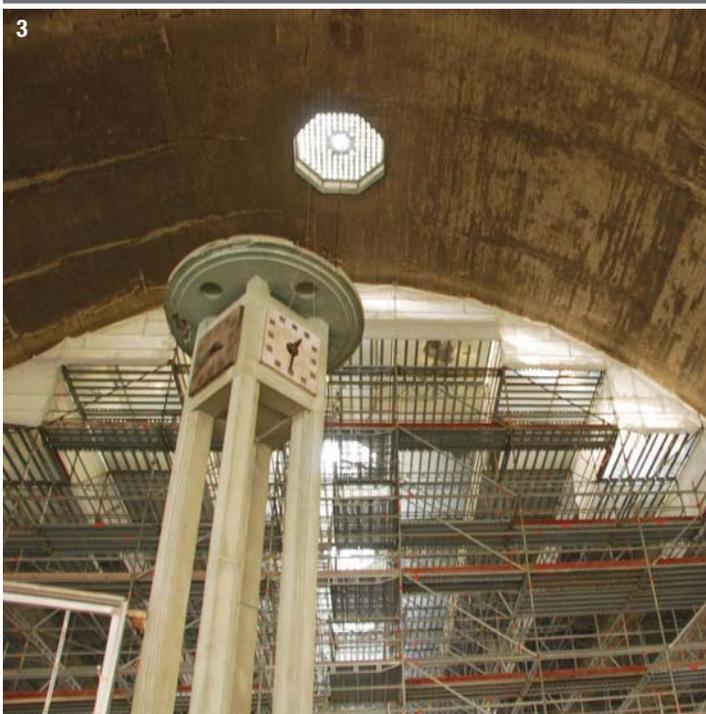
nissant et en lui donnant un aspect plus vivant. Les travaux, d'un coût estimé à 31 millions d'euros (dont 8,3 financés par l'État et 0,3 par la région Champagne-Ardenne), devront durer 2 ans à compter de février 2010.

#### LE PROGRAMME DE RÉNOVATION

Le programme initial ne se limitait pas au seul marché couvert. Il comprenait des boutiques autonomes, tandis que le marché lui-même était divisé en trois zones : les étals fixes, le carreau et le gros.

Si les halles rénovées sont destinées à redevenir principalement un marché couvert, une simple restauration « à l'identique » n'était pas envisageable du fait de l'évolution des contextes urbain et réglementaire.

Tout le travail de conception de l'architecte François Châtillon a donc été d'apporter des réponses architecturales et techniques qui soient conformes à ces



#### STRUCTURE DE L'ÉCHAFAUDAGE INTÉRIEUR

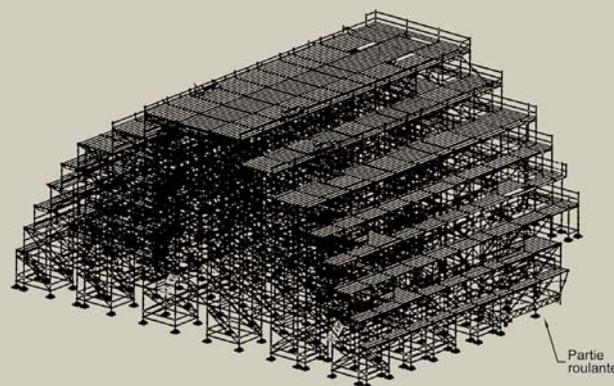


PHOTO 2 © VILLE DE REIMS — PHOTO 3 © DR — PHOTO 4 © LAYHER

4

#### UN ÉCHAFAUDAGE D'EXCEPTION

**600 tonnes d'échafaudages Universel® Layher sont utilisés sur le chantier, à l'intérieur et à l'extérieur des halles. Ces équipements ont été installés par l'entreprise Antoine Echafaudages.**

À l'intérieur, un échafaudage de 200 tonnes permet d'accéder à toutes les parties en béton. Il se présente sous la forme d'une plate-forme de 18 m de haut, 60 m de long et 34 m de large. Elle permet la reprise des 2/3 de la toiture exécutée par le dessous de la voûte et fera l'objet d'une rotation pour travailler sur le tiers restant.

Dans l'optique d'assurer les finitions après dépose de la plate-forme intérieure, 6 m sur les 60 m de la plate-forme fixe sont équipés de roues et de chemins de roulement, spécialement développés par Layher afin de résister à des charges hors normes pour un échafaudage roulant. Lorsque les 54 m d'échafaudage fixe seront démontés, la partie roulante sera scindée en 3 structures de manière à rouler plus facilement.

Les échafaudages occupent toutes les façades extérieures du bâtiment, y compris le rampant des voûtes, et un parapluie imposant, de 6 m x 24 m, s'étend au dessus des deux voûtes partiellement vitrées pour les protéger des intempéries.



5

nouvelles contraintes, sans jamais dénaturer l'œuvre de Maigrot et Freyssinet. Le principe général est de conserver au maximum l'enveloppe extérieure et l'espace principal des halles, alors que l'organisation intérieure des pavillons est remaniée pour recevoir les éléments techniques et fonctionnels exigés pour la réutilisation du lieu. Le programme comporte ainsi, outre le marché proprement dit, un aménagement de la halle centrale permettant des activités temporaires de type culturel ou sportif, ainsi que le regroupement des anciennes boutiques situées sur la rue du Temple en vue d'affecter deux grandes cellules à des commerçants permanents.

**5- Les bétons sont purgés et hydrosablés.**

**6- Le « parapluie » au dessus des voûtes partiellement vitrées.**

**5- The concretes are bled and sand jetted.**

**6- The «umbrella» above the partially glazed roofs.**

## LA RESTAURATION DES BÉTONS

L'ouvrage de Maigrot et Freyssinet constitue une prouesse technique qui marque l'histoire de l'emploi du béton armé. Si la conception rigoureuse d'origine permet de garantir les principes généraux de stabilité, les intempéries ont considérablement dégradé au fil du temps les performances et l'aspect initial des ouvrages.

En fonction de leur importance et de leur localisation, différents procédés de conservation-restauration ont donc été retenus. Selon les cas, les bétons sont restaurés, renforcés ou remplacés. Leur restauration concerne la totalité des ouvrages en élévation et les voûtes. Tous les aciers oxydés par le temps ont créé une corrosion à l'intérieur des bétons qui sont traités en totalité, sur une superficie d'environ 35 000 m<sup>2</sup>. Les bétons sont purgés, puis hydrosablés ; ils sont ensuite traités par un inhibiteur de corrosion, avant d'être recouverts, ponctuellement, d'un enduit de réparation.

D'autres procédés tels que la protection cathodique sont mis en œuvre, notamment, dans les sous-sols. Quel que soit le procédé utilisé, les voûtes sont recouvertes d'une étanchéité liquide sablée à refus pour conserver un aspect de ciment clair.

À l'intrados, les projections d'enduit de réparation sont estampées avec des outils spécifiques pour restituer l'empreinte des coffrages d'origine tandis que les élévations visibles sont traitées par des procédés qui n'altèrent pas le parement.

En façade, après traitement des bétons par inhibiteur de corrosion et reconstitution des armatures, les parements sont enduits de mortier de ciment alcalin recouvert d'une peinture minérale. Les ossatures en béton des verrières inclinées ou cintrées sont restaurées alors que les ossatures verticales des tympans sont remplacées par des réseaux de poteaux et de poutres préfabriquées clavetées avec restauration de la continuité des armatures.

## LA RESTAURATION DES VERRIÈRES

La restauration des grandes verrières des tympans fait appel à des techniques de pointe qui permettent d'en restituer la finesse et l'aspect, sans crainte des dégradations actuelles dues à la faiblesse d'enrobage des armatures.

Des résilles en béton de fibre de verre préfabriquées supportent un système de joints minces qui permettent de prendre les verres en feuillure avec toutes les garanties d'étanchéité.



6



7



8

PHOTOS 5, 6, 7 & 8 © DR

Les mastics sont remplacés par des capots chanfreinés de même teinte et de couleur mat sablée. Un système analogue est mis en oeuvre pour les verrières inclinées.

Les verres imprimés armés initiaux avec maille de 1 pouce sont encore disponibles chez St-Gobain sous le nom de « Wired Arena ». Ils sont réutilisés en parties verticales.

En revanche, pour éviter tout risque de bris, ils sont remplacés dans les parties inclinées par un montage feuilleté comportant un verre jaune imprimé en face intérieure, pour restituer l'aspect d'origine.

Le chantier a débuté en février 2010. L'ouverture au public est prévue pour février 2012. □

**7- L'échafaudage occupe toutes les façades extérieures du bâtiment.**

**8- Un échafaudage de 200 tonnes permet de rénover la face intérieure de la voûte.**

**7- The scaffolding covers all the external facades of the building.**

**8- A 200-tonne scaffolding allows renovation of the interior surface of the roof.**

## LES PRINCIPAUX ACTEURS DU CHANTIER

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Ville de Reims

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** François Chatillon (architecte en chef des Monuments Historiques), Léopold Abecassis, Brizot Masse Ingénierie, Setac, Scenergie, Qualiconsult Sécurité

**COORDINATION SPS :** Veritas

**BUREAU DE CONTRÔLE TECHNIQUE :** Qualiconsult

**PILOTAGE DE CHANTIER :** TCA

**DÉMOLITION, DÉSAMANTIAGE :** Genidem

**ÉCHAFAUDAGES :** Antoine Echafaudages

**MAÇONNERIE :** Cari Thouraud

**RESTAURATION DES BÉTONS :** Lefèvre, Renofors, Tollis, Léon Noel, MFP

**RESTAURATION DES VERRIÈRES :** MGB

**ÉTANCHÉITÉ BICOUCHE :** Champenoise d'étanchéité

**PEINTURE DE LA HALLE :** Sionneau

### ABSTRACT

## RENOVATION OF THE «HALLES DU BOULINGRIN» MARKET: AS MODERN AS WHEN FIRST BUILT

MARC MONTAGNON

**The Halles du Boulingrin market, a technical prowess of reconstruction following the war of 1914-18, was «designed» by the engineer Eugène Freyssinet who, in the design, took reinforced concrete to its technical limits. The very thin roof covers a large clear space with no supports, over a width of more than 40 m and a height of 20 m. Listed as an historical monument in 1990, the building is undergoing renovation and, in February 2012, will return to its original intended use as a covered market, while opening up to other uses of a cultural nature. □**

## RENOVACIÓN DEL MERCADO BOULINGRIN: LA MODERNIDAD COMO EN EL PRIMER DÍA

MARC MONTAGNON

**Hazaña técnica de la reconstrucción después de la guerra de 14-18, el Mercado Boulingrin fue «calculado» por el ingeniero Eugène Freyssinet que, para el establecimiento de su concepto, alcanzó con el hormigón armado sus límites técnicos. Efectivamente, la bóveda muy fina desprende un gran espacio sin ningún apoyo, de una longitud de más de 40 metros y 20 metros de altura. Clasificado monumento histórico en 1990, este mercado se encuentra en curso de renovación y volverá a encontrar, en febrero de 2012, su vocación inicial de mercado cubierto, y estará disponible además para otras manifestaciones de vocación cultural. □**