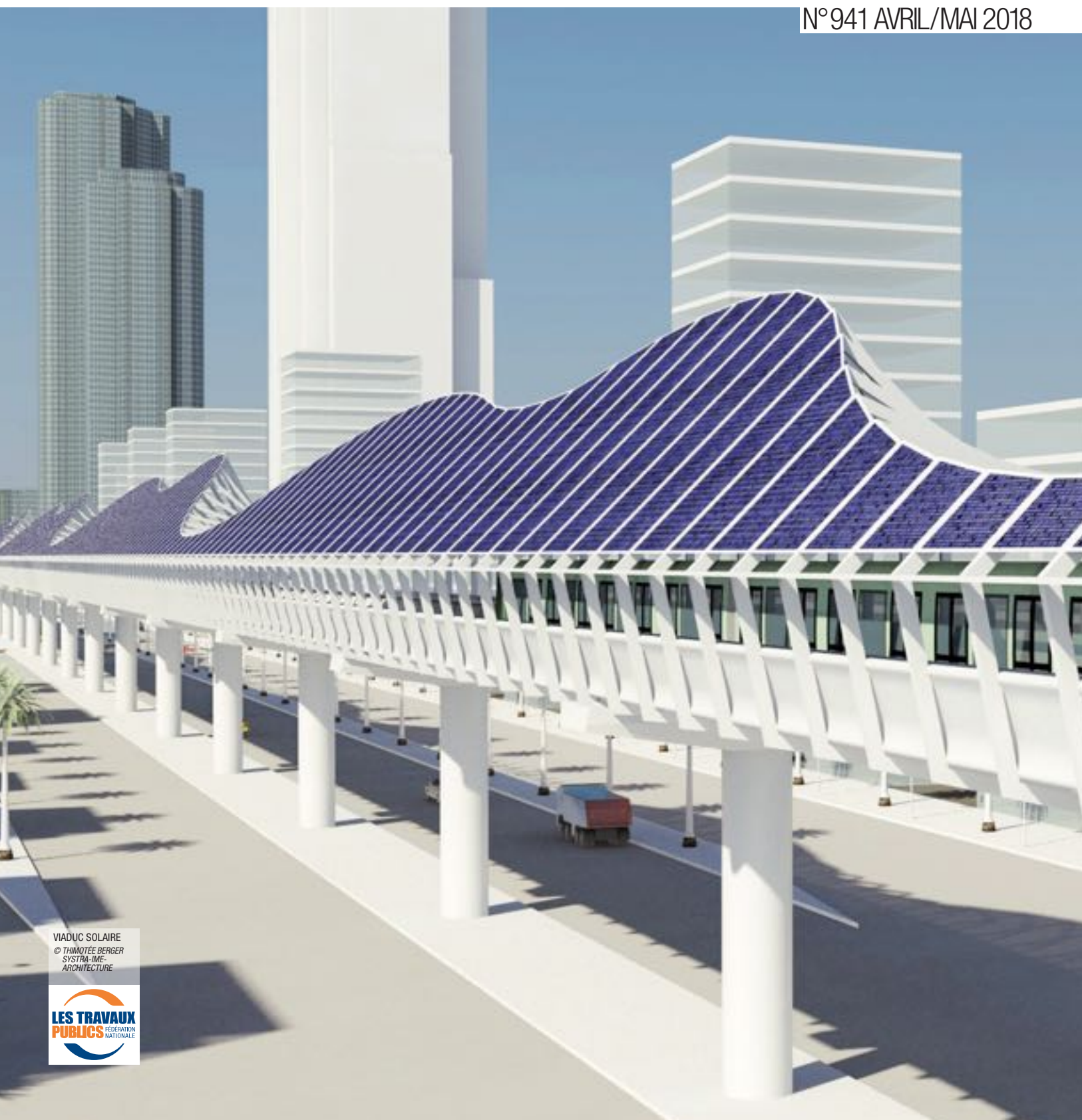


# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**SPECIAL INNOVATION. INNOVATION ET HYDROFRAISES. QUELLE INGENIERIE POUR LES CHANTIERS DE DEMAIN ? LE VIADUC SOLAIRE. LE DIGITAL DANS LES FONDATIONS. ITER : LE DEFI DU III<sup>e</sup> MILLENAIRE. PKW ET TIRANTS EXCEPTIONNELS : LE BARRAGE D'HAZELMERE (AFRIQUE DU SUD). GELITRA. CONSTRUCTION MECANISEE DE RAMEAUX INTER-TUBES. BARGE AUTOELEVATRICE SOULEVANT 4800T A LA REUNION**

N°941 AVRIL/MAI 2018



VIADUC SOLAIRE  
© THIMOTÉE BERGER  
SYSTEME-  
ARCHITECTURE

**LES TRAVAUX**  
**PUBLICS** FEDERATION  
NATIONALE



**VOUS AVEZ  
LES DONNÉES.  
MAINTENANT VOUS SAVEZ  
LES EXPLOITER**

---

**MENSURA GENIUS**

Exploitation rapide des nuages de points  
(scanners, Drone, Lidar), modélisation du terrain,  
calculs de stocks ou des cubatures...



[www.geomensura.fr](http://www.geomensura.fr)  
[contact@geomensura.com](mailto:contact@geomensura.com)

Tél. +33 (0)2 40 16 92 60



Directeur de la publication  
Bruno Cavagné

Directeur délégué  
Rédacteur en chef  
Michel Morgenthaler  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03  
morgenthalerm@fnfp.fr

Comité de rédaction  
Pierre Aristaghes (Bouygues tp), Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Florent Imbert (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)

A collaboré à ce numéro  
Rédaction  
Marc Montagnon

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  
revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC  
International (9 numéros) : 240 €  
Enseignants (9 numéros) : 75 €  
Étudiants (9 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)

Publicité  
Rive Média  
2, rue du Roule - 75001 Paris  
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44  
contact@rive-media.fr  
www.rive-media.fr

Directeur de clientèle  
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04  
b.cosson@rive-media.fr

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)

Édition déléguée  
Com'1 évidence  
2, chemin dit du Pressoir  
Le Plessis  
28350 Dampierre-sur-Avre  
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52  
revuetravaux@com1evidence.com

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 by Travaux).  
Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie SAS  
9, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n°0218 T 80259  
ISSN 0041-1906

## L'INNOVATION AU CŒUR DES TRAVAUX PUBLICS



© DR

Notre quotidien nous rappelle régulièrement que nous vivons des évolutions importantes dont beaucoup impactent fortement les infrastructures. L'Homme s'est toujours déplacé, a échangé, a communiqué, a transporté, a réalisé des échanges tout en se protégeant des contraintes climatiques.

Le développement des infrastructures, des réseaux et des véhicules au sens large fait partie de ces activités. Au cours des siècles, techniques, méthodes et outils se sont développés pour satisfaire de nouveaux besoins, de nouveaux usages. Ce sont les adaptations et les innovations successives qui ont permis ces progrès. Les règles de dimensionnement n'ont pas vraiment changé mais de nouveaux usages apparaissent, de nouvelles contraintes interviennent. Les habitudes, les références changent considérablement.

Nos métiers que l'on pensait traditionnels et immuables sont remis en cause rapidement par les effets de l'accélération technologique et de la transition numérique. La longue chaîne de l'acte de construire, du maître d'ouvrage à l'exploitant, à laquelle les entreprises participent, n'y échappe pas.

Aujourd'hui, l'innovation devient un élément de réponse essentiel pour nous adapter à ces évolutions, voire ces ruptures, dans tous les domaines d'activités.

La mesure est plus précise, les capteurs se multiplient. Les données sont capitalisables et analysables grâce aux progrès de l'informatique, à la progression des algorithmes, de l'intelligence artificielle et avec beaucoup d'outils qui se développent.

L'optimisation des structures et leur maintenance peuvent ainsi être significativement optimisées.

Le recyclage, sous toutes ses formes, dopé par les innovations, permet de diminuer le recours aux ressources naturelles.

Les progrès dans le domaine du matériel permettent de prévenir les atteintes à la santé, d'augmenter l'acceptabilité des chantiers et de réaliser des économies d'énergie.

L'utilisation du numérique augmente la qualité des ouvrages et le rendement de nos équipes en permettant d'optimiser et de sécuriser les processus.

Dans les métiers du génie civil, la composante humaine est essentielle à la réussite. L'innovation ne sera donc réellement efficace que si cette composante est réellement prise en compte dans tous ses enjeux.

Nos équipes de terrain sont depuis toujours de larges pourvoyeurs d'innovations qui seront ensuite développées dans nos laboratoires et bureaux d'études

Nous formons et nous engageons nos équipes à l'utilisation de ces nouvelles techniques et technologies, car c'est un vrai défi que de leur permettre d'utiliser les progrès issus de l'innovation avec le maximum d'efficacité.

Oui, notre profession est en mouvement pour amener, grâce à l'innovation, des solutions toujours plus satisfaisantes aux défis sociétaux et financiers.

**XAVIER NEUSCHWANDER**  
PRÉSIDENT DE LA COMMISSION  
TECHNIQUE ET INNOVATION DE LA FNTP

LISTE DES ANNONCEURS : GEOMENSURA, 2<sup>e</sup> DE COUVERTURE - CNETP, P.15 - LAFARGE, P.45 - PROBTP, P.46 - SMA BTP, 3<sup>e</sup> DE COUVERTURE - MACCAFERRI, 4<sup>e</sup> DE COUVERTURE





# SPÉCIAL INNOVATION

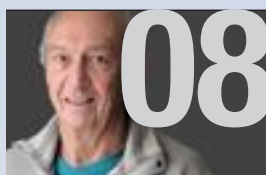
VADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION © LAURENT DE GEBHARDT







## 04 ALBUM



# 08

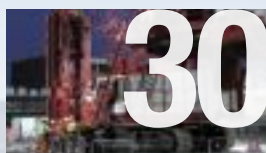
**ENTRETIEN AVEC  
PIERRE DE SLOOVERE**  
PDS CONSULT : QUAND LES MUONS  
S'INVITENT DANS LA GÉOPHYSIQUE  
APPLIQUÉE



# 16

**ENTRETIEN AVEC  
JACQUES HUILLARD  
ET DOMINIQUE VIÉ**  
CHEC : L'INGÉNIEUR D'ÉTUDES  
DU 21<sup>e</sup> SIÈCLE

## 22 EGIS : LA CRÉATIVITÉ POUR PREMIÈRE NATURE



# 30

**INNOVATION ET  
HYDROFRAISES**



# 36

**QUELLE INGÉNIERIE  
POUR LES CHANTIERS  
DE DEMAIN ?**



# 40

**LE VIADUC  
SOLAIRE**



# 47

**LE DIGITAL DANS  
LES FONDATIONS**



# 54

**ITER**  
Le défi du III<sup>e</sup> millénaire



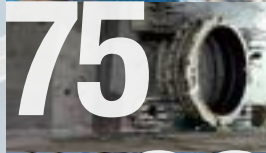
# 62

**PKW ET TIRANTS  
EXCEPTIONNELS**  
Coup double pour le barrage  
d'Hazelmere (Afrique du Sud)



# 68

**GELITRA**  
Un outil de gestion pour  
les livraisons de chantiers  
en site urbain dense



# 75

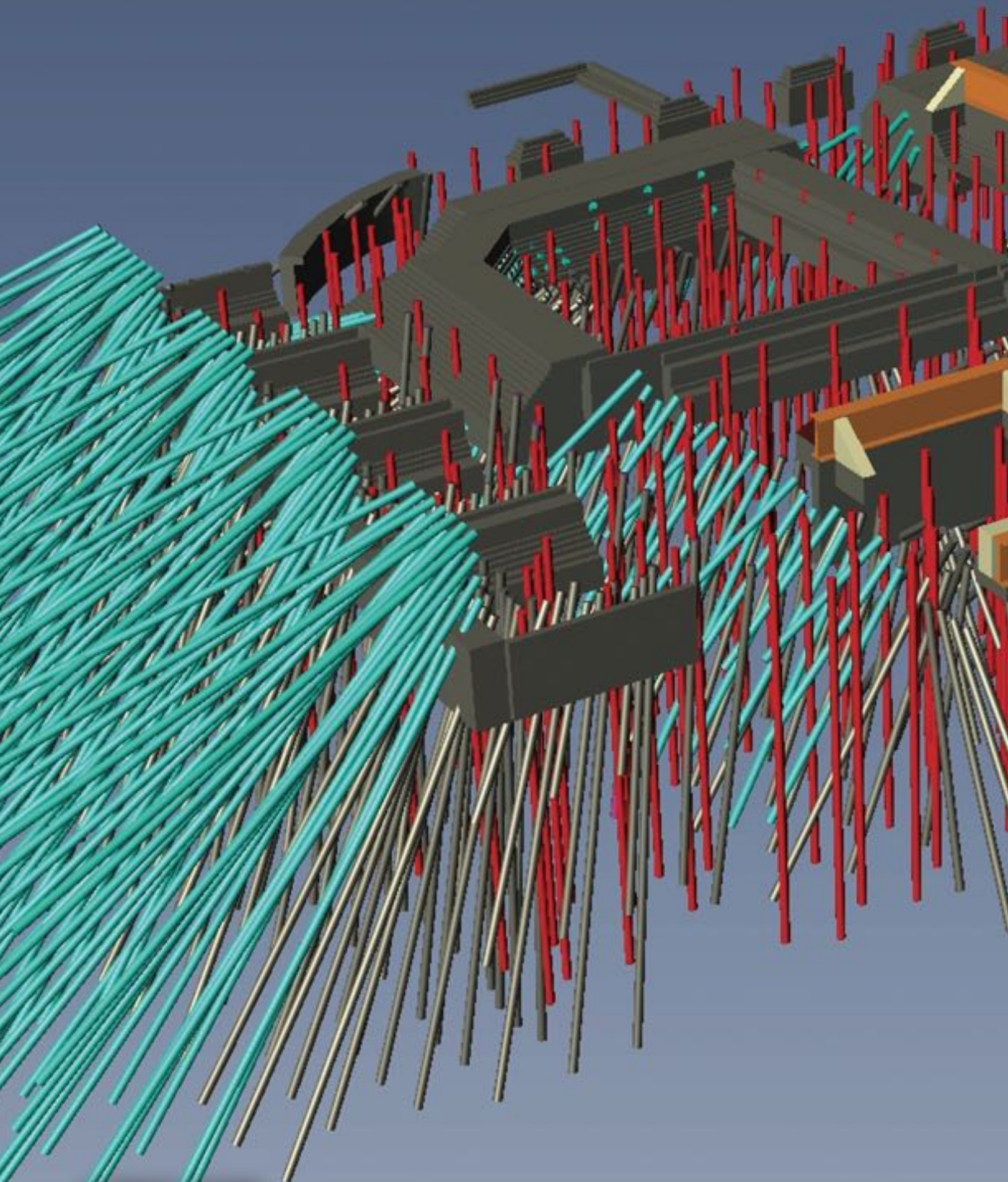
**CONSTRUCTION  
MÉCANISÉE DE RAMEAUX  
INTER-TUBES**



# 82

**VIADUC DE LA NOUVELLE  
ROUTE DU LITTORAL (NRL)  
À LA RÉUNION**  
Une barge autoélévatrice  
soulevant 4 800 t







## PLACE AU DIGITAL DANS LES TRAVAUX GÉOTECHNIQUES

**SOLETANCHE BACHY** est un pionnier pour l'introduction de l'informatique technique dans les procédés de travaux géotechniques. Aujourd'hui, le digital est utilisé avec pour objectifs d'accélérer, de visualiser, de rationaliser, de fiabiliser et d'archiver les processus d'étude, de design et de production. Exemples : les travaux d'injection et la suite de logiciels GrouIT, l'assistance au forage par supervision et le Big Data appliqué au chantier d'extension de l'aéroport de Hong Kong. (Voir article page 47).









## ZOURITE UN PETIT POULPE QUI A MANGÉ DU LION

**VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS** (mandataire), Bouygues Travaux Publics, Demathieu Bard Construction et Dodin Campenon Bernard, ont construit une barge autoélevatrice qui soulève pas moins de 4 800 t, pour acheminer et poser les voussoirs du viaduc en mer de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion. Un joli nom de baptême a été choisi, qui signifie « petit poulpe » en créole. La dimension gigantesques et les multiples fonctionnalités de cet engin sont sans conteste innovantes. (Voir article page 82).



© SÉBASTIEN MARCHAL



## PDS CONSULT

# QUAND LES MUONS S'INVITENT DANS LA GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE

DÉTECTER DES VIDES EN TUNNEL AVEC LES RAYONS COSMIQUES : CETTE MÉTHODE, PARTICULIÈREMENT ADAPTÉE À LA DÉCOUVERTE DE CAVITÉS NON RÉPERTORIÉES LORS DU CREUSEMENT DE TUNNELS, A FAIT L'OBJET D'UN DÉPÔT DE BREVET EN 2015 PAR PDS CONSULT ET LE CNRS. **ENTRETIEN AVEC PIERRE DE SLOOVERE, DIRECTEUR DE PDS CONSULT.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

### PIERRE DE SLOOVERE : PARCOURS EN BREF

Diplômé de l'École des Mines de Liège en 1970, Pierre De Sloovere a commencé sa carrière chez CPGF (Compagnie de Prospection Géophysique Française) qu'il quitte en 1978 pour rejoindre Simecsol où il débute les travaux de la Hague. Il entre chez Geostock en 1981 où il réalise notamment, en utilisant de l'azote liquide à  $-196^{\circ}\text{C}$ , un prototype de galerie de stockage de gaz naturel liquéfié à Schelle, en Belgique.

Il quitte Geostock en 1985 et crée avec Mecasol la société ME2i ; il quitte ME2i en 2011 et crée PDS Consult.

Du tout premier chantier de la fusée Ariane à Kourou (1973 - sismique), aux derniers projets de Total de stockage cryogénique dans le permafrost sibérien (avant-projet), il a été notamment actif dans la création de plusieurs ouvrages ; il a lancé le laboratoire souterrain du tunnel de Tournemire, entre Millau et Rodez, pour le compte de l'IRSN (Institut de Recherche et de Sécurité Nucléaire).

Au sein de PDS Consult il tente de résoudre des problèmes complexes et il œuvre à développer des méthodes innovantes telles que celles déjà citées ainsi que l'interférométrie radar satellitaire qu'il met en œuvre régulièrement depuis la catastrophe d'AZF et qu'il applique pour déterminer a posteriori des déplacements de terrain.

L'INFORMATION PEUT PARAÎTRE CURIEUSE : IL N'EN EST RIEN. PIERRE DE SLOOVERE, INGÉNIEUR DIPLÔMÉ DE L'ÉCOLE DES MINES DE LIÈGE AYANT, COMME IL LE DIT LUI-MÊME, UN PIED DANS LA GÉOPHYSIQUE ET UN PIED DANS LA GÉO-MÉCANIQUE, NOUS EXPLIQUE COMMENT, À LA SUITE DE LA LECTURE D'UN ARTICLE DANS LA REVUE « POUR LA SCIENCE » (ÉDITION FRANÇAISE DE SCIENTIFIC AMERICAN), IL A ÉTÉ AMENÉ À DÉVELOPPER POUR LES TUNNELS UNE APPLICATION DE CETTE MÉTHODE BASÉE SUR L'OBSERVATION DES MUONS.

### Quel est le principe de détection des vides par les muons ?

La terre est bombardée en permanence d'un flux isotrope de rayons cosmiques qui produisent, au contact de l'atmosphère terrestre, des particules élémentaires de courte durée de vie : les muons, qui présentent une masse supérieure à celle des électrons et inférieure à celles des protons et neutrons, leur permettant de pénétrer dans les sols sur plusieurs centaines de mètres. Les muons sont des électrons lourds (200 fois la masse de l'électron) qui ont donc une charge négative et dont le flux au niveau de la mer est d'environ 130 particules par  $\text{m}^2$  et par seconde. Ils dévient peu dans la traversée de l'atmosphère.

Tout comme le rayonnement gamma, les muons se retrouvent en plus grand nombre s'ils traversent des vides ou des faibles densités et en nombre plus faible dans les structures denses (minerais essentiellement).

Ce sont des particules, certes beaucoup plus grosses que des électrons,

mais encore neuf fois plus petites que les protons et les neutrons. Elles se glissent entre les molécules constituant la croûte terrestre mais perdent de l'énergie quand elles rencontrent de la matière.

C'est cette différence d'absorption entre vide et terrain de densité normale qui peut alors être exploitée pour rendre compte d'excès ou de déficits de masse dans le sol.

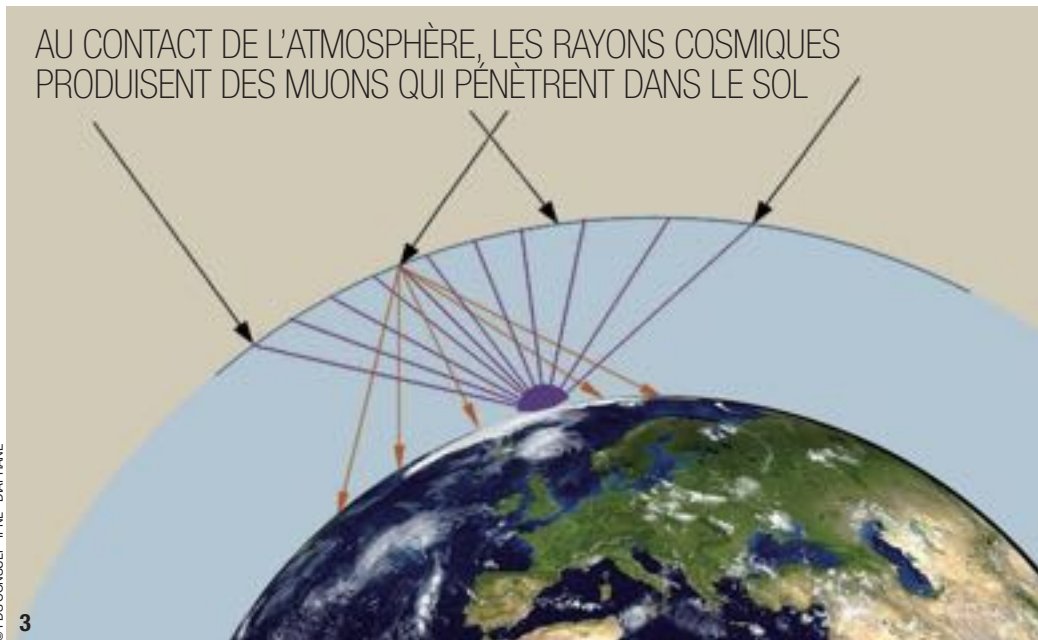
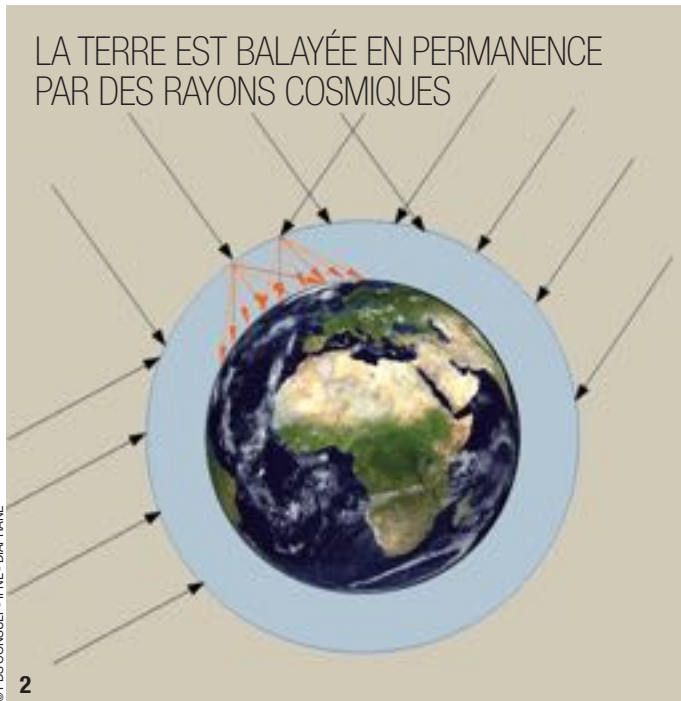
Un détecteur de muons performant, qui permet de déterminer toute variation de densité au-dessus, même à des angles très faibles, peut donc permettre d'analyser la densité des terrains se situant à un niveau égal ou supérieur à lui.

Cette technique est utilisée depuis 2008 par l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL) rattaché au CNRS, pour ausculter les volcans.

Une équipe française du CNRS, constituée de l'IPNL, de l'Institut de Physique du Globe et de Géosciences Rennes est très active dans ce domaine et a notamment ausculté en détail plusieurs volcans actifs : la Soufrière de Basse-



- 1- Pierre de Sloovere, directeur de PDS Consult.
- 2- La terre est balayée en permanence par des rayons cosmiques.
- 3- Au contact de l'atmosphère, les rayons cosmiques produisent des muons qui pénètrent dans le sol et ne sont freinés que par une plus forte densité du sol.
- 4- Isotropie des trajets des muons pénétrant dans le sol.



Terre en Guadeloupe, l'Etna en Sicile ou encore le Mayon aux Philippines. Ils ont développé dans ce but un « télescope à muons » capable de détecter les déplacements du magma dans une cheminée volcanique, qui pourrait être le précurseur d'un outil de détection utilisable en tunnel. Dans son prolongement, de mai à septembre 2015, un télescope à muons a été installé dans le tunnel de la Croix-Rousse à Lyon, dans le cadre d'une collaboration entre l'IPNL, PDS Consult et le CETU. Outre le funiculaire de la Croix-Rousse et les cheminées d'aération, la méthode a détecté un parking 70 m plus haut, non répertorié dans les plans.

### Comment les muons sont-ils détectés ?

Pour détecter un muon, il suffit de placer sur son trajet un capteur qui ponctionne une faible fraction de son énergie et la convertit en signal lumineux. Les photons produits sont détectés et amplifiés au moyen d'un photomultiplicateur.

Un seul capteur est suffisant pour détecter une particule, mais pas pour déterminer avec certitude absolue que celle-ci est un muon, ni quelle est sa trajectoire.

Pour passer du simple détecteur et obtenir ce qu'on appelle un télescope permettant de déterminer la direction des muons, il faut utiliser plusieurs panneaux munis de détecteurs permettant de localiser les impacts sur les panneaux successifs.

Chaque panneau est composé de deux couches de 16 détecteurs rectangulaires très allongés montées à 90° l'une de l'autre. Ce montage permet de fabriquer un damier de détection où un impact de particules est repéré suivant ses coordonnées XY.

Avec un seul panneau, on sait qu'on a des impacts de particules, mais on ne connaît toujours pas la direction de propagation des muons ; on ne sait donc pas d'où viennent ces muons.

On utilise au minimum deux damiers de détecteurs pour former un télescope capable de mesurer la provenance des muons suivant quelques centaines de directions ; on peut ainsi établir une carte des impacts sur le télescope et leur direction.

Un troisième damier de détecteurs permet d'éliminer les parasites et d'être certain que les particules observées sont bien des muons. Ainsi constitué, un télescope répond aux exigences précédentes.



En installant un deuxième télescope à un endroit différent, on augmente et améliore les informations recueillies par le système de détection. On a alors les informations nécessaires pour réaliser une tomographie permettant de reconstituer une carte en 3 dimensions d'un volcan, des alentours d'un tunnel et de localiser précisément les zones de densité plus élevée ou inférieure : karsts, vides. En résumé, on compte des impacts en un temps donné sur une surface, on connaît l'énergie électromagnétique produite par ces impacts et la direction de ces impacts du fait de la géométrie des deux damiers. À partir de ces données, on reconstitue par inversion la position des anomalies de densité.

Vu le nombre d'impacts relativement faible, de l'ordre de 1 par cm<sup>2</sup> par stéradian et par seconde, les durées de mesure sont longues : plusieurs jours, voire plusieurs semaines. En cumulant les mesures pendant plusieurs jours, la précision de la mesure est beaucoup plus grande et les différences entre les flux venant de différentes directions plus significatives.

Le nombre d'impacts plus élevé pour les particules venant d'une direction donnée signifiera qu'il y a un déficit de masse.



5  
© N. LESPARRE

Les paramètres qui dimensionnent l'efficacité de la mesure sont donc au nombre de cinq :

- La dimension des capteurs fixée en pratique à quelques centimètres carrés ;
- Les densités des milieux traversés par les muons ;
- Les distances parcourues dans chaque milieu ;
- La durée de l'acquisition ;
- Le bruit de fond particulière.

**5- Télescope à muons dans les galeries du Mont Terri : deux damiers de 256 pixels de 5 cm de côté chacun, distants l'un de l'autre de 1,20 m.**

**6- Un damier ou une matrice d'acquisition.**

**7- Détermination du trajet des muons avec trois damiers.**

La dimension des capteurs étant pratiquement fixée, les variables ne sont que quatre. Dans le domaine des travaux souterrains elles ne seraient plus que de trois car les quelques dizaines de mètres de recouvrement au-dessus des galeries souterraines sont suffisantes pour pratiquement éliminer le bruit de fond particulière.

Les mesures réalisées sur les volcans et les estimations déjà faites montrent que la méthode peut être adaptée aisément aux travaux souterrains.

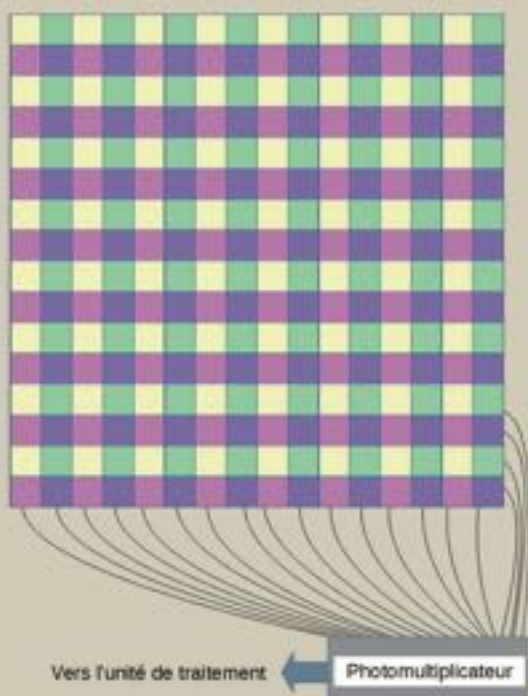
Le milieu est d'autant plus favorable qu'il ne subsiste en travaux souterrains que trois variables : le déficit ou excès de densité, la longueur de la zone présentant cette différence de densité réellement traversée par un muon, la durée d'observation.

**Quelles sont les informations obtenues à l'aide de ce télescope, par exemple celui de la Soufrière ?**

La Soufrière de Basse-Terre est un volcan hydrothermal, à lave très riche en eau, potentiellement explosif, très étudié depuis une « éruption avortée » qui a eu lieu en 1974.

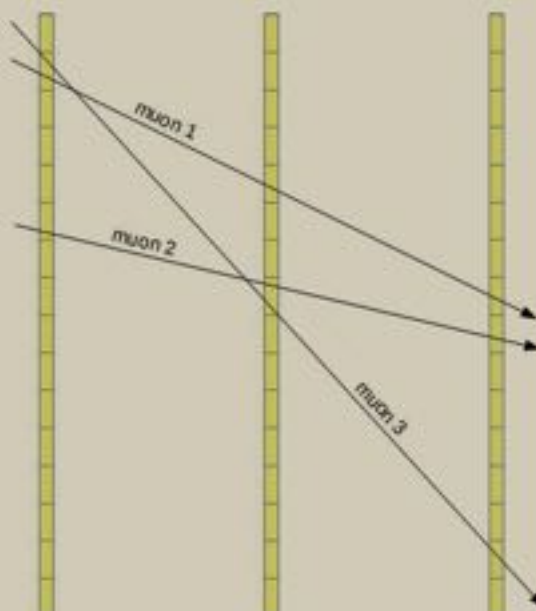
Le télescope à muons a été modifié pour s'adapter aux conditions climatiques et à l'absence d'alimentation

## UN DAMIER OU UNE MATRICE D'ACQUISITION



6

## DÉTERMINATION DU TRAJET DES MUONS AVEC TROIS DAMIERS



7





© DOCUMENTATION GUADELOUPE

8

électrique permanente. L'objectif était de déterminer la position de cheminées contenant du magma plus dense que les roches encaissantes et de suivre l'évolution du magma. Il est orienté suivant un axe quasi horizontal pour intercepter les muons provenant du cône de la Soufrière. L'objectif est ici de déterminer les montées et les descentes du magma dans la cheminée de la Soufrière. Le télescope est laissé dans ce cas plusieurs semaines, fonctionnant sur batterie. Dans le cas de mesures en surface, d'autres particules viennent gêner les mesures, ainsi que des muons arrivant « dans le dos » ; le troisième panneau de capteurs est indispensable alors qu'en galerie souterraine, quelques mètres de sol suffisent à éliminer la quasi-totalité des rayonnements parasites.

L'observation de quelques-uns des trajets rectilignes allant vers le télescope permet de mesurer le nombre de muons reçus suivant toutes ces directions. On compare ensuite le nombre attendu en l'absence de conduits de lave en sachant que la lave présente une densité de 2,7, celle du cône volcanique étant approximativement 2,2. Le télescope a ensuite été déplacé et a observé le volcan suivant deux autres directions de manière à obtenir une vision de meilleure qualité par inversion des différents signaux.

Ceci a permis de définir la forme de cette cheminée avec une précision supérieure à celle des moyens jusqu'ici employés : électrique, gravimétrie, sismique. Des variations ont été constatées dans le flux des muons qui permettent de voir la lave bouillir, la vapeur s'évacuer et la lave redescendre, ce qui explique les fumerolles de nouveau présentes depuis quelques années.



© PDS CONSULT - IPNL - DIAPHANE

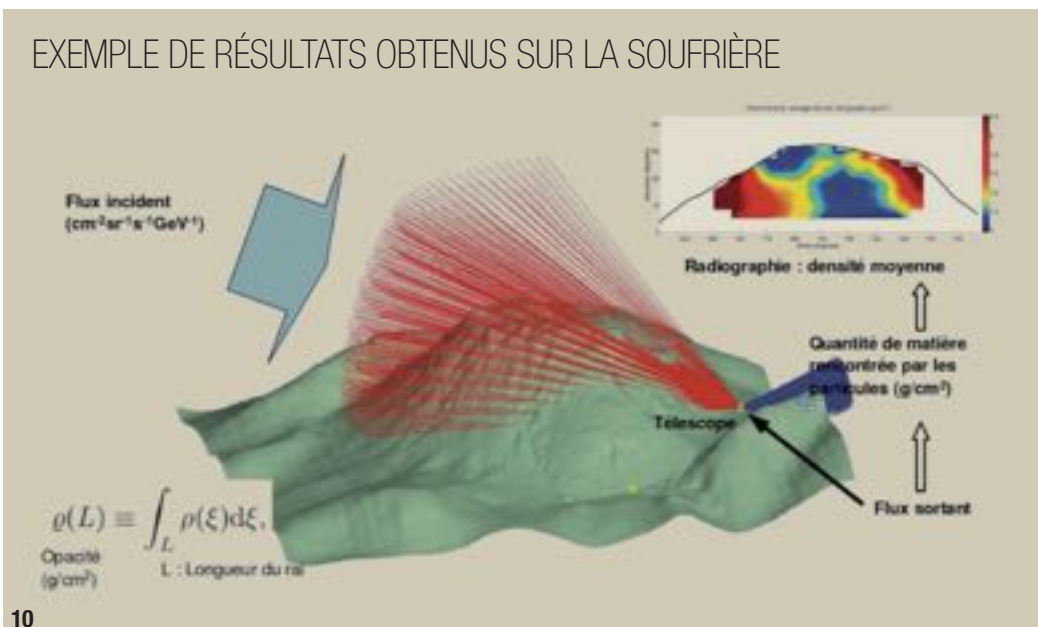
9

**8- Le volcan de la Soufrière en Guadeloupe.**

**9- Le télescope à trois damiers de la Soufrière avec l'esquisse du trajet d'un muon traversant les trois damiers.**

**10- Exemple de résultats obtenus sur la Soufrière. En rouge on observe un panneau complet comprenant de nombreux trajets de muons qui permettent d'établir dans ce plan une coupe de densités.**

## EXEMPLE DE RÉSULTATS OBTENUS SUR LA SOUFRIÈRE



© PDS CONSULT - IPNL - DIAPHANE

10

### Quelles sont les applications de la technique dans les tunnels ?

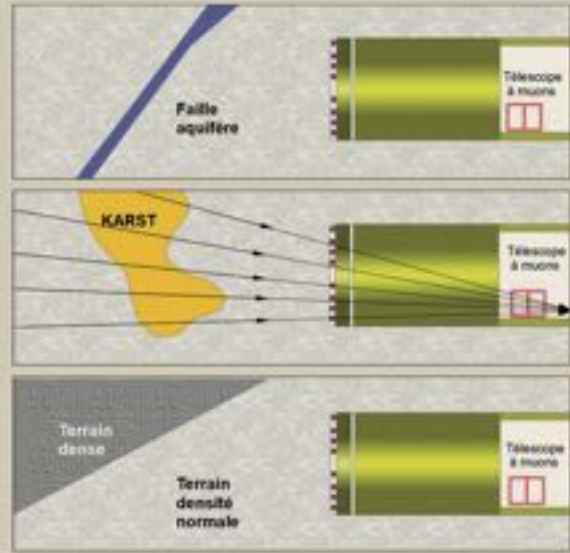
La technique devrait être utile avant, pendant et après la construction d'un tunnel pour prévoir et cartographier les contacts géologiques, les variations de densité dues à des vides dans un sens, les concrétions dures dans l'autre. Avant la construction, un détecteur de muons permettrait de déterminer par avance les risques d'un site et de choisir avec discernement le trajet le mieux adapté. Durant la construction, la même méthode permettrait de prévenir de l'approche de risques identifiés et d'éviter des accidents. On peut imaginer diverses applications de cette technique dans les projets de tunnels.





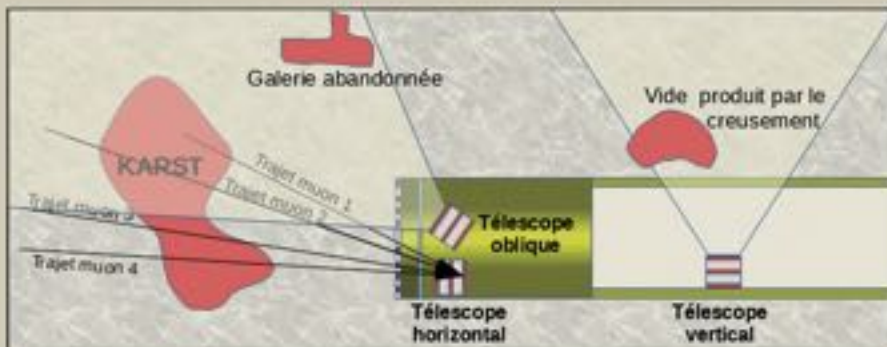
11

APPLICATION EN TUNNELS CREUSÉS AU TUNNELIER DANS TROIS TYPES DE TERRAIN



12

TROIS TÉLESCOPES INSTALLÉS DANS UN TUNNELIER : HORIZONTAL, OBLIQUE, VERTICAL



13

© PDS CONSULT - IPNL - DIAPHANE

11- Installation du télescope à muons dans le tunnel de la Croix Rousse à Lyon.

12- Application en tunnels creusés au tunnelier dans trois types de terrain.

13- Trois télescopes installés dans un tunnelier : horizontal, oblique, vertical.

14- Mesure de variation du niveau d'eau dans un château d'eau.

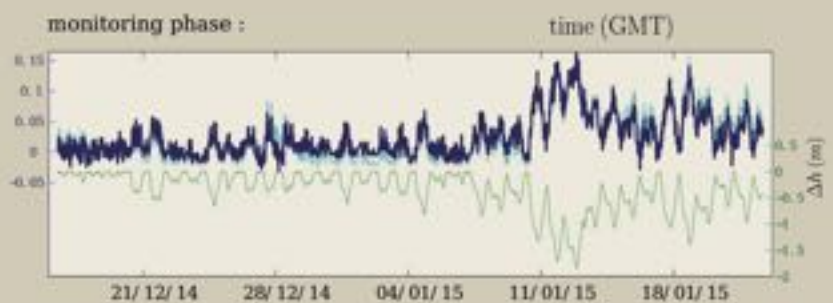
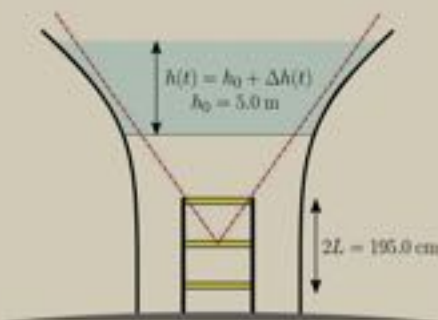
Avant, il s'agit de faire le choix d'un tracé en évitant éventuellement une zone à risque ou potentiellement à risque. Ce risque potentiel est-il réellement un risque ? C'est à ce type de question que peut répondre la

méthode. Par exemple un calcaire karstique est-il réellement karstique sur le trajet envisagé pour le tunnel ? Pendant la construction, on peut installer un télescope muonique directement sur le tunnelier.

On devrait pouvoir détecter des vides ou des variations de densité sur le tracé, des carrières oubliées sur le tracé ou au-dessus, des fontis créés par le tunnelier. Par la suite le télescope à muons pourra être largement

modifié pour être totalement intégré dans le tunnelier. Les premiers tests sur tunnelier sont prévus en 2018 sur le Grand Paris Express. PDS Consult vient de recevoir une commande de reconnaissance par muons pour le lot

MESURE DE VARIATION DU NIVEAU D'EAU DANS UN CHÂTEAU D'EAU



14

© PDS CONSULT - IPNL - DIAPHANE





15

© MARC MONTAGNON

T2C du Grand Paris Express, passée par NGE pour le groupement Alliance. Les premières estimations montrent qu'avec une couverture rocheuse de quelques dizaines de mètres, des contrastes de densité de l'ordre de 10% sont observables à l'échelle de la semaine. Après la construction, si des problèmes se posent qui semblent être inhérents au terrain, on peut également envisager des applications de la méthode pour déterminer des zones décomprimées ou des évolutions de ces zones décomprimées.

Une première expérimentation a été réalisée en Suisse dans les galeries du Mont Terri et en France dans le tunnel de Tournemire, dans un environnement proche de nos tunnels en construction. Une collaboration de recherche entre le CETU, l'IPNL et PDS Consult a permis de monter une expérimentation en vue de tester cette méthode de reconnaissance de tomographie par muons en site urbain.

L'objectif final étant d'apprécier dans ce contexte l'efficacité de la méthode à détecter des structures anthropiques

souterraines connues (tunnel, puits, galeries) c'est-à-dire des vides présentant un fort contraste de densité avec le terrain encaissant.

### À l'issue des données communiquées par le télescope, comment la mesure est-elle analysée ?

On mesure comme en diagraphie gamma le nombre de photons qui viennent heurter les éléments du télescope. Comme en rayonnement gamma, plus la densité du terrain est élevée, plus

il y a de matière, moins on reçoit de photons. L'atténuation du signal va dépendre de l'opacité du terrain sur le trajet parcouru par le muon.

L'opacité suivant une direction est le rapport entre le flux de particules mesuré sur le flux de particule qui devrait être reçu s'il n'y avait aucune anomalie sur le trajet. Autrement dit, il y a une atténuation plus forte du signal en cas de densité plus forte sur le trajet suivi par la particule et à l'inverse une atténuation plus faible en cas de densité plus faible ou de vide.

En pratique, on part d'un modèle de terrain obtenu à partir des informations géologiques recueillies, pour estimer un flux de muons théorique. Ce modèle de terrain s'enrichira ensuite au fur et à mesure que les résultats seront plus nombreux, mais il est important de partir d'un bon modèle de terrain.

En mettant la source ou les récepteurs en différents endroits autour du "patient", on obtient plusieurs informations sur la même portion du corps étudié, on peut faire l'inversion du signal pour effectuer une tomographie permettant de réaliser des vues en deux ou trois dimensions de l'objet de l'auscultation. On peut faire exactement la même chose en travaux souterrains.

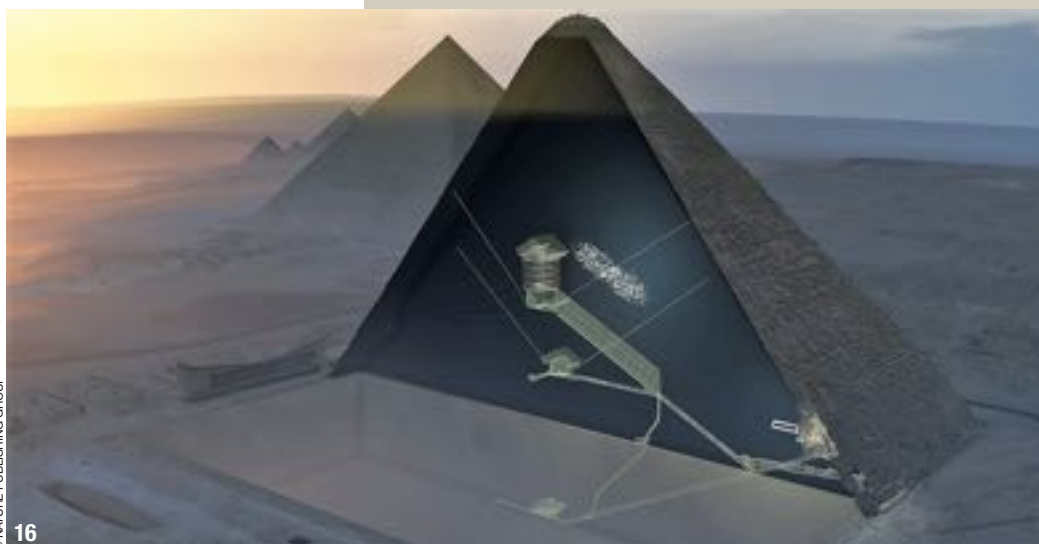
**15- La pyramide de Khéops, de 139 m de hauteur, construite il y a plus de 4500 ans, est la plus grande de celles du plateau de Gizeh.**

**16- Le vide découvert dans la pyramide de Khéops aurait une longueur d'au moins 30 m.**

## LES MUONS ET LA CAVITÉ « CACHÉE » DE LA PYRAMIDE DE KHÉOPS

La présence d'une cavité "aussi grande qu'un avion de 200 places en plein cœur de la pyramide" de Khéops, monument de 139 m de haut et 230 m de large sur le plateau de Gizeh, dans la banlieue du Caire, a été découverte grâce à des télescopes capables d'analyser la quantité de "muons".

Ceci confirme que cette méthode permet bien de déterminer des vides à une distance a priori inconnue dans une structure massive : terrain, barrage, pyramide, digue, du moment qu'elle se situe à une altitude au moins égale ou supérieure à celle du télescope à muons.



© NATURE PUBLISHING GROUP

16

### Quels sont les avantages du procédé ?

L'avantage principal est de disposer d'une technique permettant d'ausculter le terrain dans toutes les directions au-dessus du point de mesure, quelle que soit la nature du terrain.

La méthode permet de déterminer la valeur de la variation de la densité (en plus ou en moins) et de la situer précisément dans l'espace sans devoir faire appel à des hypothèses secondaires (comme dans les méthodes électriques ou électromagnétiques) ou des traitements exigeant des temps de calcul importants.





17 © GRUNICH

Les capteurs sont simples à construire, robustes et largement testés dans les conditions de terrain. Ils bénéficient de plus d'un savoir-faire éprouvé depuis de nombreuses années.

#### ... les inconvénients ?...

Comme pour les diagraphies gamma, on compte des impacts de particules ; celles-ci n'étant pas très nombreuses, la dimension du capteur ne peut être réduite : quelques centimètres carrés en général.

Le volume d'un télescope, de l'ordre de 1,4 m<sup>3</sup> : 1,5 m de haut (s'il est orienté verticalement) et 0,85 m<sup>2</sup>, n'est donc pas négligeable, mais il est léger et aisément démontable et transportable ; toutefois ces dimensions peuvent être réduites.

La direction, et donc l'angle de visée, d'où doit venir l'essentiel de l'information recherchée, a son importance. Les muons proviennent de toutes les directions de l'espace et peuvent arriver horizontalement ou même avec un angle légèrement négatif, mais la longueur du trajet dans le terrain sur des muons se propageant quasi horizontalement est importante et les désintégrations augmentent avec le temps, ce qui nécessite un plus long temps d'observation sur un trajet horizontal.

Si les tunnels ont des recouvrements très importants - sous l'axe des Alpes par exemple - avec des recouvrements supérieurs à 500 m l'absorption sera trop importante et les temps d'observation trop longs.

## LES MUONS SUR LE MONT TERRI

**Le Mont Terri est le laboratoire suisse de la NAGRA, l'équivalent suisse du tunnel de Tournemire géré par l'IRSN (Institut de Recherche et de Sécurité Nucléaire). C'est en fait une galerie annexe au tunnel routier reliant Neuchâtel à Montbéliard ; on est donc typiquement dans l'environnement des travaux publics. L'objectif est de détecter les variations d'interface entre les argilites de l'Opalinus et le calcaire. Le télescope a été orienté de manière à ce que la direction de la visée soit à peu près normale à la surface de contact entre l'argile et le calcaire. Des variations de l'ordre de la dizaine de mètres ont été détectées. Le télescope a été déplacé plusieurs fois pour augmenter la précision et cartographier la totalité de la galerie.**

**En outre, le télescope à muons mesurant des densités, ses résultats ont servi à calculer beaucoup plus précisément les corrections des mesures gravimétriques effectuées sur ce site.**

**17- L'un des tunnels d'expérimentation du Mont Terri.**

**18- Télescope à muons oblique.**

#### ... et les limites ?

C'est strictement un compteur de quantité de masses ou de densité suivant une direction donnée, pour un rayon unique, d'une multitude de directions pour le télescope tel que décrit. Plus précisément, suivant le nombre, la surface et l'espacement des pixels, le télescope à muons mesure quelques centaines à quelques milliers de directions comprises dans un angle solide de 60 à 80°.

La méthode muonique ne fournit aucun renseignement sur les caractéristiques électromagnétiques du terrain (pas dans notre domaine d'intérêt au moins), ni sur les comportements mécaniques des terrains ou des massifs.

#### Comment voyez-vous l'avenir de cette technique dans la construction de tunnels ?

La technique d'auscultation par muons présente des caractéristiques uniques : elle permet d'ausculter les terrains sur des trajets rectilignes venant de toutes les directions et mesurant sur chacun des trajets des décalages éventuels de densité.

C'est un peu comme si on disposait d'un gravimètre travaillant non pas sur des volumes, mais sur des vecteurs, sachant lire des déficits ou des excès



18

© PDS CONSULT - IPNL - DIAPHANE



## SISMIQUE FRÉQUENTIELLE : UNE MÉTHODE TROP MÉCONNUE

Il est une autre méthode dont Pierre De Sloovere entend promouvoir le développement : c'est la sismique fréquentielle dont il est démontré qu'elle constitue un outil pour vérifier la continuité de la transmission des contraintes dans un massif ; elle reste néanmoins peu utilisée.

C'est une méthode de contrôle des injections, de contrôle de continuité de massifs, d'absence ou de présence de vides. Cela est utile par exemple pour déterminer que le toit d'une exploitation minière est resté stable, même 50 ans après son abandon (cas de Chizeuil). Cela peut l'être aussi pour détecter des karsts inattendus sous des fondations (cas de Tournai) ou de l'absence de défauts dans l'argile devant devenir un stockage de déchets radioactifs (Mol, Belgique).

Le principe en est simple : il s'agit d'émettre un choc mécanique dans un terrain et d'analyser en fréquence le signal reçu par un récepteur en plusieurs points du massif. Le champ de contrainte produit par le choc voit son spectre modifié par le terrain : en milieu continu, le modèle viscoélastique de Kelvin-Voigt montre que les fréquences transmises sont plus élevées si le module

élastique est élevé ; il en est de même si la viscosité est élevée. En milieu fracturé, les fractures jouent le rôle d'un filtre passe-bas : à toute largeur de fissure correspond une longueur d'onde minimale au-delà de laquelle il n'y a pas transmission de la vibration de part et d'autre de la fracture. En conséquence, les hautes fréquences ne passent que s'il n'y a pas de fissures, si le module élastique est élevé et si la viscosité est importante.

À Chizeuil, sept forages de 50 m réalisés au-dessus de l'exploitation ont permis de montrer que les hautes fréquences étaient transmises au-dessus de la mine sur 20 m ou plus avec une remarquable continuité ; aucune basse fréquence n'apparaît, les contraintes passent dans la voûte naturelle, le toit de la mine n'est donc pas fissuré.

L'exemple de Tournai est l'inverse du précédent : une trentaine de forages de 18 m de profondeur ont permis de dessiner une carte sommaire des karsts en-dessous de fondations en cours de réalisation et de délimiter précisément un certain nombre de secteurs, ce qui a permis de poursuivre la construction avec un maximum d'informations.

de masse venant de toutes les directions en leur attribuant une direction et une intensité à chacun. Pour les familiers des diagraphies, un télescope à muon pourrait être considéré comme un récepteur de rayonnements d'un

gamma-densimètre utilisant une multitude de sources gamma disposées en surface et en admettant que les rayons gamma soient beaucoup plus pénétrants qu'ils ne le sont : quelques centaines de mètres au lieu de quelques

décimètres. Ces deux exemples qui font fi de certaines lois de la physique ont simplement pour but de montrer la puissance de la méthode muonique. Logiquement on ne peut que conclure que la détection par muon est proba-

blement une méthode qui va rapidement s'imposer en travaux souterrains. Il est ainsi surprenant qu'aucune société savante ou association de notre milieu « géo-méca » n'ait jamais été particulièrement curieuse sur ce sujet. □



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

### CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

#### Nos missions :

assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics  
procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **270 000 salariés**.

#### Nos coordonnées :

##### Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

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

Par mail : sur [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr), lien [nous contacter](#)

##### 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





# CHEC L'INGÉNIEUR D'ÉTUDES DU 21<sup>e</sup> SIÈCLE

LE CHEC (CENTRE DES HAUTES ÉTUDES DE LA CONSTRUCTION) A FÊTÉ EN 2017 SES 60 ANNÉES D'EXISTENCE. CRÉÉ PAR LES PROFESSIONNELS DES TRAVAUX PUBLICS ET DU BÂTIMENT, IL A POUR MISSION DE FORMER CHAQUE ANNÉE, SOIT DE JEUNES INGÉNIEURS OU UNIVERSITAIRES À L'ISSUE DE LEUR FORMATION INITIALE, SOIT DES INGÉNIEURS D'ENTREPRISE DÉSIRANT ÉTENDRE LEURS COMPÉTENCES. DÈS LA FIN DE CE CYCLE DE 10 MOIS, LES DIPLÔMÉS SONT CAPABLES DE PRENDRE EN CHARGE LA CONCEPTION TECHNIQUE ET L'EXÉCUTION DES OUVRAGES LES PLUS COMPLEXES, EN FRANCE COMME DANS LE MONDE. **ENTRETIEN AVEC JACQUES HUILLARD ET DOMINIQUE VIÉ, PRÉSIDENT ET DIRECTEUR DU CHEC.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



JACQUES HUILLARD ET DOMINIQUE VIÉ, RESPECTIVEMENT PRÉSIDENT ET DIRECTEUR DU CHEC, NOUS EXPLIQUENT L'INTÉRÊT QUE PEUVENT REVÊTIR, À L'ISSUE D'UN CURSUS D'INGÉNIEUR, LES ENSEIGNEMENTS DISPENSÉS DANS CETTE ÉCOLE.

#### Qu'apporte le CHEC aux élèves et aux entreprises ?

De nos jours, les projets du BTP sont de plus en plus complexes à concevoir et à réaliser tout en étant toujours plus performants : optimisation des matériaux, des formes, etc. Les nouveaux outils de représentation offrant des possibilités

considérables pour libérer l'imagination des architectes, ces derniers proposent des ouvrages innovants dont l'élégance est souvent associée à des géométries très irrégulières. En conséquence, pour les ingénieurs, les projets sont de plus en plus complexes à concevoir, à dimensionner et à construire.

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © XAVIER CHABERT - LEC



C'est pourquoi les connaissances nécessaires à l'ingénieur d'études sont de plus en plus étendues, et les formations initiales ne permettent que de donner une maîtrise des méthodologies de base qui restent souvent insuffisantes pour aborder ces nouveaux ouvrages à la complexité croissante. C'est là que le CHEC présente tout son intérêt. Pour les ingénieurs fraîchement diplômés, il offre un cursus d'études focalisé principalement sur l'acquisition et la maîtrise des connaissances ainsi que des outils permettant d'être tout à fait à l'aise pour traiter les grands projets d'aujourd'hui. Pour les entreprises qui recrutent ces élèves, c'est un moyen d'enrichir leurs bureaux d'études et de méthodes par des ingénieurs performants, capables de mener à bien les projets auxquels elles sont maintenant confrontées et cela sans avoir à les former en interne pendant de longues années.

### Dans l'environnement professionnel technique en bouleversement permanent, comment le CHEC se situe-t-il ?

La mission du CHEC est de former des ingénieurs opérationnels dès leur arrivée dans un bureau d'études ou de méthodes. Elle s'appuie sur deux orientations complémentaires :

- Fournir aux élèves le complément de connaissances fondamentales nécessaires pour comprendre l'évolution des techniques et de la réglementation ;
- Les initier aux opérations essentielles de leur futur métier : conception et dimensionnement des ouvrages, choix des hypothèses de calcul, mise au point des plans et documents nécessaires à l'exécution.

## DOMINIQUE VIÉ ET JACQUES HUIILLARD : PARCOURS COMPARÉS

**Dominique Vié est polytechnicien (promotion 1976) et ingénieur civil des Ponts et Chaussées (promotion 1981).**

**Au début de sa carrière, il passe quelques années au sein d'une agence d'architecture avant d'entrer au CEBTP en 1986, au sein duquel il occupe le poste de directeur technique et scientifique jusqu'en 2005.**

**Il est directeur du CHEC depuis septembre 2005.**

**Le parcours de Jacques Huillard est foncièrement différent puisqu'il se déroule en totalité en entreprise.**

**Diplômé de l'ESTP (dont il dirige la Fondation depuis 4 ans) en 1973, après une coopération au Tchad, il fait ses premières armes au bureau d'études de Fougerolle (BIEP) qu'il rejoint en 1975 et quitte en 1978 pour entrer à la SGE (devenue Vinci) où il occupe plusieurs postes en France pendant 4 ans puis en Asie du Sud-Est de 1982 à 1991 d'abord basé à Singapour pour un important chantier de bâtiment puis à Hong-Kong d'où il dirige l'activité de l'entreprise sur l'ensemble de la zone.**

**Lors de son retour en France, il quitte SGE en 1991 pour intégrer Quillery (devenue Eiffage) où il est en charge de plusieurs régions françaises entre 1991 et 1997. Il est directeur de Eiffel (groupe Eiffage) de 1997 à 2004, avant de devenir président de la branche « métal » du groupe, Eiffage Métal de 2004 à 2015 (Construction métallique, Façade, Maintenance industrielle).**

**Jacques Huillard est président du CHEC depuis 2005.**

**1- De gauche à droite, Dominique Vié et Jacques Huillard, respectivement directeur et président du CHEC.**

**2- La passerelle de Décines à Lyon - (architectes : Lavigne & Chéron).**

**3- L'un des îlots « bois » du projet « Deux Rives » à Strasbourg.**

**4- L'U Arena de Nanterre - (architecte : Christian de Portzamparc).**

Il s'agit donc d'une formation de spécialisation, orientée « projet », destinée aux ouvrages neufs mais aussi anciens car l'innovation, c'est aussi savoir relire la tradition et être capable de l'adapter aux outils de calcul et aux règlements actuels.

Ceci nous amène à aborder un autre sujet relatif à l'évolution du métier. Lorsque le CHEC a été créé en 1957, si les bureaux d'études d'entreprise existaient déjà, il n'en était pas de même des bureaux d'ingénierie encore très peu nombreux. Mais la situation a évolué. Si les premiers étudiants du CHEC intégraient quasiment tous

une entreprise, la moitié aujourd'hui rejoint des bureaux d'ingénierie, un bon quart seulement entre en entreprise et un petit quart dans les bureaux de contrôle. De nos jours, en effet, les bureaux d'études d'entreprise se sont fortement réduits alors que les bureaux d'ingénierie et de contrôle ont connu un développement important.

### Quels sont les phénomènes qui ont fait évoluer le métier de l'ingénieur d'études ?

D'une part, l'apparition de formes nouvelles de marchés (concessions, PPP...) consiste, au-delà du seul acte de construire, à s'intéresser au coût global de l'ouvrage, y compris pendant son exploitation.

D'autre part, l'exigence sociétale, de plus en plus forte qui demande des ouvrages non seulement sûrs et économiques mais qui, en plus, satisfassent de nouveaux critères, indices de développement durables, bilan CO<sub>2</sub>, performance énergétique etc., mais aussi des critères plus subjectifs d'insertion de l'ouvrage dans l'environnement. Pour l'homme « études », ces nouvelles exigences, rendent le métier plus complexe, favorisent le travail en réseaux et demandent à repenser l'organisation qui doit être pluridisciplinaire. Au lieu de se cantonner dans sa spécialité, chacun se doit de prendre en considération la globalité du problème et les spécificités liées à chaque métier, sans oublier les performances techniques et économiques qui restent incontournables. Pour continuer à remplir ses missions, l'ingénierie s'appuie sur des outils informatiques très performants qui donnent des gains de productivité sensibles et permettent de mieux se consacrer aux tâches plus complexes exigées par « l'approche globale ». ▶







5



6



7

FIGURE 5 © CHEC - FIGURES 6 & 7 © MARC MONTAGNON

## LE CHEC EN BREF

Le CHEC est situé à Arcueil, dans une ancienne chaudronnerie. Son architecture industrielle en structure métallique a été entièrement repensée et habillée de matériaux contemporains par une architecte de talent qui l'a adaptée aux impératifs de fonctionnalité et d'agrément d'un établissement d'enseignement supérieur. Un amphithéâtre y a été intégré tout en conservant au bâtiment son « âme » et sa référence au monde industriel, notamment son pont roulant.

Le CHEC comporte actuellement 4 spécialités :

- Le CHEBAP (Centre des Hautes Études du Béton Armé et Précontraint) ;
- Le CHEM (Centre des Hautes Études du Métal) ;
- Le CHEB (Centre des Hautes Études des Structures Bois), mastère agréé par la CNGE, en partenariat avec l'ENSTIB d'Épinal ;
- Le CHEMEX (Centre des Hautes Études des Méthodes d'Exécution).

L'enseignement se partage entre formation théorique, séances d'applications, projets et stage (CHEB et CHEMEX).

Les programmes des sections CHEBAP, CHEM et CHEB présentent de nombreux points de similitude : il s'agit d'acquérir une maîtrise de la pratique du projet de construction. Certains cours sont donc communs aux trois sections.

La formation CHEMEX est orientée vers les méthodes d'exécution et si l'organisation générale est assez similaire à celles des autres sections, il n'y a, sauf cas particuliers, pas de cours commun avec celles-ci.

Le cursus des trois sections CHEBAP, CHEM et CHEB est parallèle, il comporte 7 mois d'enseignement suivis par l'étude de projets concrets. Celui du CHEB se termine par un stage en entreprise ou bureau d'études. La section CHEMEX prévoit un stage d'insertion en entreprise de 4 mois, de novembre à février.

La scolarité débute le premier lundi de septembre. Sa durée est de 10 mois pour le CHEM et le CHEBAP, de 13 mois pour le CHEB, stage de Mastère inclus, et de 14 mois pour le CHEMEX.

Le corps enseignant est constitué d'ingénieurs praticiens et de cadres supérieurs de la profession. L'enseignement du CHEC permet ainsi l'acquisition d'un savoir-faire qui répond aux besoins des entreprises de construction de recruter des ingénieurs de haut niveau. La pédagogie, conçue dans un esprit d'entreprise, permet l'acquisition des compétences nécessaires à la réalisation des études de conception (sections CHEBAP, CHEM et CHEB) ou des études d'exécution et des études de prix (CHEMEX).

Il est toutefois essentiel que l'ingénieur d'études conserve la maîtrise des outils et son esprit critique par rapport aux résultats obtenus.

Aujourd'hui, la notion même de « bon » ingénieur a évolué : dans une entreprise, un « bon » ingénieur n'est plus seulement un bon technicien, c'est également un bon gestionnaire, voire un bon manager. Les bons ingénieurs

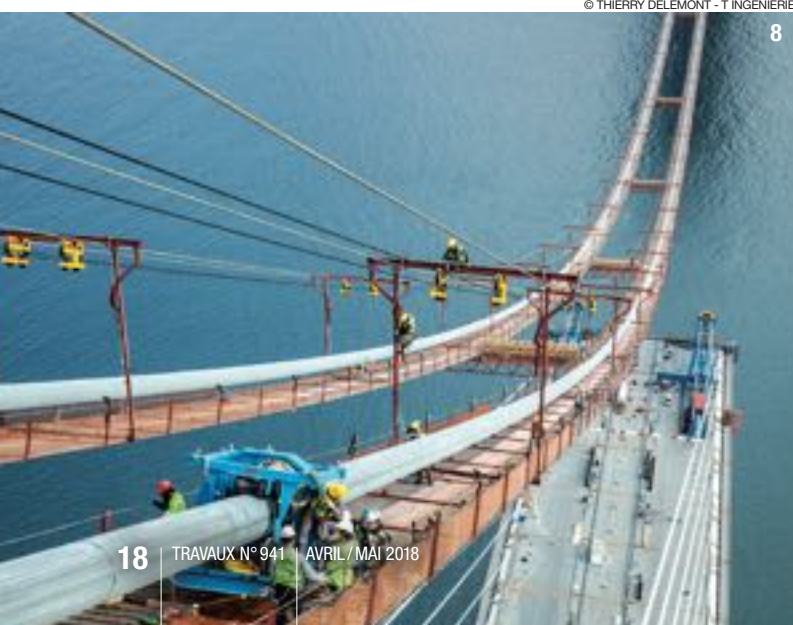
au sens technique du terme se trouvent désormais dans les bureaux d'étude ou dans les bureaux d'ingénierie.

### Quelle est la place des nouvelles technologies dans le métier de l'ingénieur structure ?

Le développement de l'informatique ne dispense pas de l'acquisition des sciences fondamentales. Force est

même de constater que c'est exactement le contraire. Si l'on veut obtenir une approche pertinente en phase de pré dimensionnement d'un projet, il faut posséder une connaissance plus approfondie du béton armé, du béton précontraint ou de la charpente métallique. Mais l'acquisition des connaissances fondamentales ne doit pas être recherchée au détriment de l'initiation au

métier d'ingénieur qui fait l'objet de cours d'introduction aux techniques de réalisation des ouvrages (cours de spécialité), de séances d'application et de projets. D'autre part et quelle que soit son évolution, l'informatique ne demeure et ne doit rester qu'un outil qui ne dispense pas qu'on apprenne à le maîtriser en étant confronté à des situations réelles de projets.



8



9

© THIERRY DELÉMONT - T INGÉNIERIE

© T. CHAPUIS

Ce n'est simple ni à expliquer, ni à faire comprendre. L'un des responsables du grand bureau d'étude belge Greisch, qui a à son actif des références emblématiques dans le domaine de la modélisation et du calcul des structures, nous disait récemment, à propos de la plaquette de présentation de sa société : « Tout cela, ce sont de beaux modèles. Mais, un beau modèle, il fonctionne quand on en connaît le résultat avant d'avoir fait le modèle ».

La question est : comment connaître le résultat avant d'avoir fait le modèle ? Quelle technique, quelle méthode utiliser pour y parvenir ? Plus les modèles sont compliqués - comme c'est le cas aujourd'hui - plus la règle de trois de l'ingénieur atteint ses limites. Il ne suffit pas de concevoir un modèle, il faut s'assurer de sa fiabilité. Au CHEC, nous sommes là pour transmettre des méthodes qui vont permettre de trouver le résultat avant d'avoir fait le modèle. Si les techniques ont évolué, le constat que nous évoquons ici n'est pas nouveau. On peut citer notamment Eugène Freyssinet qui s'exprimait ainsi en 1954 dans la revue Travaux : « Il n'existe pour moi que deux sources d'information : la perception directe des faits et l'intuition en laquelle je vois l'expression et le résumé de toutes les expériences accumulées par la vie dans le subconscient des êtres, depuis la première cellule. Il faut, bien entendu, que l'intuition soit contrôlée par l'expérience. Mais quand elle se trouve en contradiction avec le résultat d'un calcul, je fais refaire le calcul, et mes collaborateurs assurent souvent que, en fin de compte, c'est le calcul qui a tort... »

Les enseignements que nous dispensons au CHEC se situent dans cette logique : développer son intuition exige la confrontation à des situations de pro-

jet réelles et c'est pourquoi l'enseignement est assuré par des professionnels. Notre objectif est que nos élèves arrivent à développer une approche intuitive du cheminement des efforts dans les structures. Il s'agit d'une démarche nécessaire pour répondre à l'évolution des métiers de la construction, et en particulier de celui de l'ingénierie.

**5- Le CHEC est installé dans une ancienne fondrie dont l'architecte chargée du réaménagement du site a eu la bonne idée de conserver le pont roulant.**

**6- L'amphithéâtre du CHEC.**

**7- L'une des salles de cours.**

**8- Compactage du câble principal du dernier pont sur le Bosphore pour lui donner une forme circulaire.**

**9- Le hall principal de la gare de Wuhan, en Chine (architectes : JM. Duthilleul, E. Tricaud).**

**10- Maquette 3D du fond de la Garonne avec calepinage de pose des gabions de confortement du pont de pierre à Bordeaux.**

**11- Verrière et charpente de la gare d'Austerlitz à Paris après rénovation.**

## Quelles sont les origines du CHEC ?

Le CHEC a été fondé en 1957 par la Fédération Française du Bâtiment et la Fédération Nationale des Travaux Publics qui ont été rejointes très rapidement par des syndicats professionnels tels que EGF-BTP et le SCMF.

L'idée de départ était de permettre à de jeunes ingénieurs de compléter leurs connaissances et surtout d'acquiescer les compétences nécessaires à la pratique professionnelle du projet de construction en entreprise, afin d'être directement opérationnels, y compris sur la conception des ouvrages de haute technicité.

Au départ, l'école ne comportait qu'une seule section : elle était généraliste et tous les types d'ouvrages y étaient étudiés. Mais, dès 1959, deux sections complémentaires ont été ouvertes : le CHEBAP, consacré au « béton armé précontraint » et le CHEM, dans le domaine de la « construction métallique ».

En 2003, une section spécialisée dans les « structures bois », le CHEB, a été créée en partenariat avec l'ENSTIB d'Épinal. En 2011 nous avons recréé la section « méthodes d'exécution », le CHEMEX, qui avait existé au début des années 70, en tant que complément de formation proposé aux élèves du CHEBAP, puis pendant quelques années, de 1982 à 1985, en tant que filière parallèle au CHEBAP et au CHEM. Enfin, dans le cadre de son partenariat avec l'IMGC et depuis la rentrée 2014, le CHEC propose aux élèves du CHEBAP intéressés par le diagnostic, la maintenance et la réhabilitation des ouvrages de génie civil, un nouveau cursus baptisé CHEMER.

Tous ces parcours sont ouverts à tous les étudiants issus d'une école d'in-

génieurs intéressés par une année de spécialisation ainsi qu'aux ingénieurs ayant déjà une expérience en entreprise ou en bureau d'études et qui souhaiteraient s'inscrire en formation continue.

## Comment se déroule la formation ?

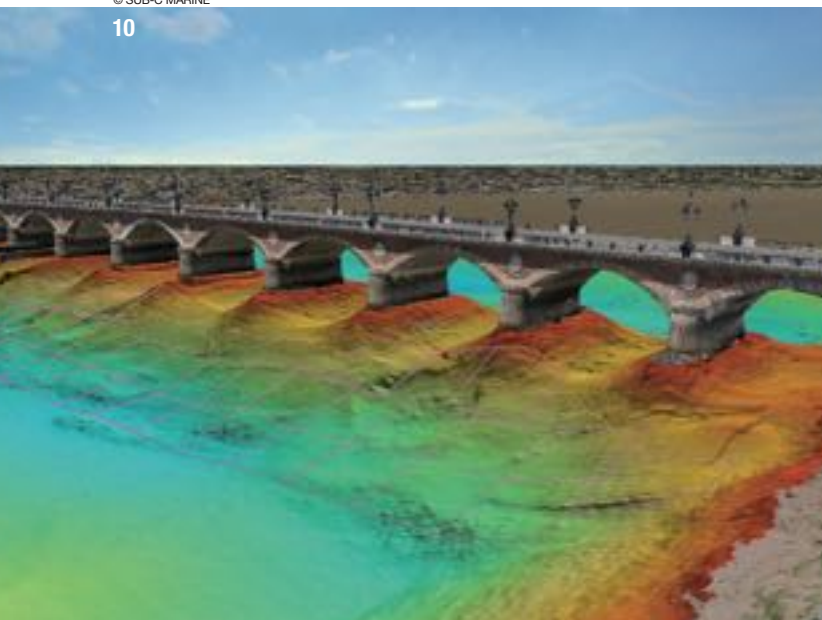
La formation dispensée au CHEC est partagée entre enseignement fondamental et enseignement pratique, mais aussi d'un temps de familiarisation avec les éléments et les techniques de formalisation d'un projet de construction. L'enseignement est fondé sur quatre parties complémentaires : analyse des structures et modélisation, calcul réglementaire, conception des ouvrages, sciences humaines et sociales. L'ensemble représente environ 800 heures de cours.

Les connaissances acquises au cours de la formation initiale sont d'abord mises en œuvre dans le cadre de séances de travaux dirigés qui constituent déjà une confrontation avec les situations de projet : réalisation de descentes de charges, études de dimensionnements, conception de câblages de précontrainte. La validation des compétences fait largement appel à la réalisation de projets professionnels réalisés en groupes de trois élèves, ce qui permet également l'apprentissage des relations internes à l'entreprise et du travail en équipe.

Pour manifester l'importance que revêt la pratique du projet de construction qui constitue l'aboutissement de l'enseignement dispensé au CHEC, plusieurs projets sont récompensés chaque année : au CHEBAP, un projet de pont précontraint et un projet d'ossature de bâtiment, au CHEM, un projet d'ossature industrielle par exemple. Il en est de même au CHEB et au CHEMEX. ▷

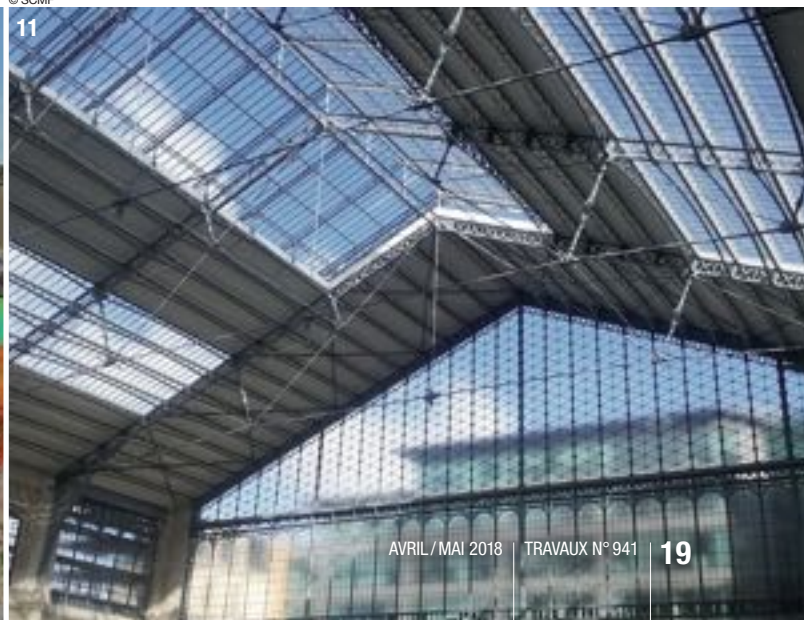
© SUB-C MARINE

10



© SCMF

11





## ACCRÉDITATION CTI ET CERTIFICAT EUR-ACE

Le CHEC est désormais la 7<sup>e</sup> école de spécialisation reconnue par la CTI. Après délibération le 14 mars 2017 et approbation en séance plénière le 12 avril 2017, la CTI a prononcé une première décision d'accréditation, pour une durée de 3 ans à compter du 1<sup>er</sup> semestre 2017, concernant le Centre des Hautes Etudes de la Construction (décision n° 2017/03-09).

Ce diplôme d'ingénieur de spécialisation, s'adresse aux élèves du CHE-BAP, du CHEM et du CHEMEX titulaires d'un titre d'ingénieur au sens de la loi française (ou à des titulaires d'un diplôme étranger reconnu comme tel). Ceux qui souhaiteront s'inscrire dans ce cadre devront effectuer un stage de 6 mois à l'issue de leur parcours au CHEC. L'accréditation est accordée aussi bien dans le cadre de la formation initiale que de la formation continue.

Les autres élèves recevront, comme auparavant, le Certificat du CHEC, décerné par l'école, signé par le Président de la Fédération Nationale du Bâtiment et par le Président de la Fédération Nationale des Travaux Publics.

La filière CHEB reste un mastère spécialisé organisé en partenariat avec l'ENSTIB.

Les premiers diplômes de spécialisation seront délivrés à la fin de la session 2017/2018 et porteront l'intitulé suivant : « Ingénieur spécialisé diplômé du Centre des Hautes Études de la Construction ».

Par ailleurs, le CHEC a reçu le certificat EUR-ACE co-signé par le président de l'ENAAE et le président de la CTI. Le label EUR-ACE est un référentiel de qualité international établi pour le domaine spécifique des formations d'ingénieurs. Les formations délivrées au CHEBAP, au CHEM et au CHEMEX obtiennent donc ainsi une visibilité internationale.



© MARC MONTAGNON 12

### Quel est l'intérêt d'être agréé par la CTI ?

Jusqu'en 2011, la question ne s'était jamais posée mais une étude préliminaire avait été soumise à la CTI en 2013.

Les conséquences financières de la réforme de la taxe d'apprentissage intervenue en 2014, qui privait le CHEC de cette recette, ont contribué à nous inciter à rentrer dans ce cadre.

Mais notre réflexion s'est accompagnée d'une volonté d'améliorer la visibilité du

CHEC dans le contexte européen caractérisé par le cycle licence-maîtrise-doctorat (LMD).

Agréé par la CTI depuis avril 2017, le CHEC est désormais une école de spécialité à part entière. Elle est même quasiment la seule en France destinée aux étudiants visant les métiers de l'ingénierie<sup>(1)</sup> et du bureau d'études dans le secteur du BTP, au même titre, par exemple, que l'IFP School<sup>(2)</sup> de Rueil-Malmaison, anciennement ENSPM, dans le secteur pétrolier et parapétrolier.

L'objectif est de situer le CHEC en tant qu'école de spécialisation au niveau BAC+6. Il est à noter que seuls les titulaires d'un titre d'ingénieur reconnu par la CTI peuvent bénéficier du titre d'ingénieur de spécialisation.

Les autres reçoivent un certificat d'établissement.

### Quelle est l'organisation du CHEC ?

Le CHEC est doté d'un CA et d'un conseil de perfectionnement. Si le pre-

mier assure essentiellement la gestion de l'école tout en s'assurant qu'elle reste en adéquation avec les attentes de la profession et des fédérations, le conseil de perfectionnement veille à ce que la formation dispensée demeure d'une haute technicité, supérieure à celle des écoles de formation initiale du secteur de la construction dont la formation est devenue plus généraliste sous la pression du milieu professionnel et de la complexification de la réglementation.



Dans cette organisation, le CHEC est doté d'un directeur scientifique - Jean-Pierre Muzeau, universitaire d'origine - et d'un directeur des études par filière. À ceci s'ajoute un comité exécutif comprenant le président et le directeur du CHEC ainsi que le directeur scientifique et les directeurs des études.

### Une évolution s'est-elle dessinée au niveau du recrutement des élèves depuis la création du CHEC ?

Lorsque l'école a été créée en 1957, les étudiants français représentaient 90 % des effectifs et les étudiants étrangers de l'ordre de 10 %. Cette répartition est restée stable jusqu'au milieu des années 80 puis elle a énormément changé. Aujourd'hui, 50 % des élèves sont originaires de plusieurs continents : l'Afrique du Nord avec le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie), l'Afrique de l'Ouest avec le Cameroun, la Mauritanie et le Sénégal, le Moyen Orient avec tout spécialement le Liban ainsi que l'Extrême-Orient avec le Cambodge et le Vietnam.

Tous ces étudiants sont titulaires de diplômes d'ingénieur de leur pays. Nous développons d'ailleurs des partenariats avec leurs écoles d'origine.

### Quel nombre d'élèves accueillez-vous chaque année au CHEC ?

Le CHEC accueille chaque année de l'ordre de 150 étudiants : 90 au CHEBAP, 25 à 30 au CHEM, 10 à 15 au CHEB et 15 à 20 au CHEMEX.

Le cycle de formation se déroulait à l'origine sur un an, de septembre à juin. Maintenant, afin de correspondre au format des écoles de spécialisation reconnues par la CTI (Commissions des Titres d'Ingénieur), il tend vers



14  
© REGARDS

**12- Copie du certificat d'ingénieur spécialisé diplômé du Centre des études de la haute construction.**

**13- La passerelle de la Darse du Millénaire en bordure du canal Saint-Denis (architecte : Explorations Architecture).**

**14- La tour Majunga à La Défense (architecte : Jean-Paul Viguier et associés).**

**15- Le nouveau barrage de Chatou sur la Seine (architecte : Luc Weizmann).**

**16- Chantier du viaduc de l'Auxence sur la LGV Tours - Bordeaux.**

une durée de 18 mois comprenant un an de cours et de projets complété, à la demande, par six mois de stage. En effet, le CHEC accueille des étudiants de niveau BAC +5 ayant déjà un diplôme d'ingénieur reconnu par la CTI, mais aussi des étudiants ne disposant pas d'un tel diplôme, soit parce qu'ils sont titulaires d'un master universitaire, soit parce qu'ils ont un diplôme d'ingénieur d'une école étrangère.

### Quelle est la provenance des étudiants français ?

Pendant ses premières années d'existence, de 1957 à 1985, les promotions du CHEC étaient constituées en moyenne de 50 % d'étudiants issus de l'ESTP, 30 % issus des INSA<sup>(3)</sup> et des ENSAM et 20 % d'écoles étrangères. Aujourd'hui, le recrutement en France s'est extrêmement diversifié. Pour les écoles d'ingénieurs, il concerne essentiellement l'ESTP, toujours, mais aussi

les INSA (Lyon, Rennes, Strasbourg, Toulouse...), les Instituts Mines-télécom (IMT) de Lille-Douai et d'Alès (ex-Écoles des Mines), ainsi que la plupart des écoles du réseau Polytech<sup>(4)</sup> - Clermont-Ferrand, Grenoble, Lille, Orléans, Nice - ce qui représente entre 40 et 50 élèves ingénieurs par an. Nous acceptons également les élèves disposant de maîtrises universitaires ou issus d'une formation plus généraliste, mais notre objectif principal est de dispenser une formation technique complémentaire à celle des écoles d'ingénieurs ou des établissements universitaires du secteur de la construction.

L'un de nos souhaits est que ces écoles informent leurs étudiants qui souhaitent faire une carrière en bureaux d'études ou de méthode que le CHEC est une excellente opportunité pour eux. C'est aussi notre rôle lorsque nous présentons l'école dans certains de ces établissements. □

1- Avec près de 400 entreprises adhérentes et 11 délégations régionales, **Syntec-Ingénierie** est la fédération professionnelle de l'ingénierie.

2- **L'IFP School** (anciennement ENSPM - École nationale supérieure du pétrole et des moteurs) est l'une des 210 écoles d'ingénieurs françaises habilitées à délivrer un diplôme d'ingénieur.

3- **INSA** : Institut National des Sciences Appliquées.

4- **Polytech** est le premier réseau français des écoles d'ingénieurs polytechniques internes des universités.

**Les photos de chantiers et de réalisations illustrant l'interview rappellent les quatre spécialités du CHEC : le béton armé et précontraint, le métal, les structures bois, les méthodes d'exécution.**

**N.D.L.R.**

© MARC MONTAGNON

15



© COSEA

16







© INTREPID PRODUCTION 1

# EGIS LA CRÉATIVITÉ POUR PREMIÈRE NATURE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

PARCE QUE SA VOCATION EST D'AIDER LES POPULATIONS ET DÉCIDEURS À TIRER PARTI DES GRANDES TRANSITIONS ACTUELLES (ÉCOLOGIQUE, ÉNERGÉTIQUE, NUMÉRIQUE...), EGIS CONTRIBUE ACTIVEMENT À L'AVÈNEMENT D'UNE SOCIÉTÉ POST-CARBONE ET INVESTIT CHAQUE ANNÉE PRÈS DE 16 MILLIONS D'EUROS EN R&D. SON RÔLE ? IMAGINER LES SOLUTIONS TECHNIQUES QUI PERMETTRONT DE RÉPONDRE AUX GRANDS DÉFIS SOCIÉTAUX ACTUELS ET À VENIR, AUTOUR DE 5 AXES MAJEURS D'INNOVATION : LA MOBILITÉ SOUS TOUTES SES FORMES, L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT, LA BIODIVERSITÉ, LA VILLE DURABLE, LES OUTILS ET MÉTHODES MIS EN ŒUVRE DANS LES PROJETS ET/OU DESTINÉS À FAIRE ÉVOLUER LE SECTEUR DE L'INGÉNIERIE DE LA CONSTRUCTION. LE POINT SUR CES GRANDES THÉMATIQUES D'INNOVATION AVEC MARTIAL CHEVREUIL, DIRECTEUR BUSINESS INNOVATION AU SEIN D'EGIS ET PRÉSIDENT DE LA COMMISSION INNOVATION DE SYNTEC INGÉNIERIE.

Et si les transformations à l'œuvre étaient autant d'opportunités pour façonner le monde de demain ? Voilà une réflexion qui ne manque pas d'interroger tous ceux qui souhaitent agir pour assurer un avenir durable à notre société.

« Nous devons accueillir le changement, la complexité et la contrainte comme des opportunités. Car la contrainte, autant que la liberté d'entreprendre, est partie intégrante de notre identité d'ingénieur, souligne Martial Chevreuil. Les mutations en cours dans nos sociétés sont de formidables leviers pour innover

et agir sur le monde qui nous entoure. Ainsi, les transitions écologique, énergétique et démographique, la révolution numérique, l'émergence de nouveaux modèles économiques sont autant de bouleversements qui exigent de nous toujours plus d'inventivité et de technicité pour pouvoir expressément aux besoins évolutifs de nos clients ».

Pour que cette créativité porte ses fruits au-delà des projets spécifiques et lui permette d'anticiper les besoins du marché, Egis cultive ainsi depuis de nombreuses années une politique d'innovation affirmée.

**1- Le « tramway autrement<sup>®</sup> » à Besançon.**

## MOBILITÉ

Tout en développant des solutions pour la conception et la construction d'infrastructures durables, Egis développe des innovations pour une meilleure utilisation de l'existant. Cette démarche marque d'ailleurs un tournant dans les métiers de l'ingénierie.

## LE « TRAMWAY AUTREMENT »

Dans le domaine de l'équipement des villes en lignes de tramway, Egis a développé la démarche "tramway autrement<sup>®</sup>", qui propose quatre familles de tramways adaptées aux diverses configurations urbaines : le tram classique, le tram court, le tram économique et le tram express.

Pour chaque type de tramway ont été définis des aménagements urbains spécifiques, des stations et dépôts, une finesse de desserte, un degré de technologie, une capacité des véhicules et une fréquence d'exploitation.

Des options sont proposées, allant des plus qualitatives aux plus optimisées. Cette solution a déjà été adoptée par Aubagne, Avignon et Besançon.

## LISSAGE DES PICS DE TRAFIC ROUTIER

La congestion du trafic routier a des conséquences néfastes pour l'environnement, l'économie et la qualité de vie. Afin d'y remédier, Egis a développé un programme de lissage de pics du trafic routier afin de désengorger la ville tout en rétribuant les automobilistes vertueux. L'objectif est de gérer l'espace routier de façon dynamique. « Avec sa filiale néerlandaise BNV Mobility, ajoute Martial Chevreuil, Egis propose à Rotterdam une solution de lissage des pics de trafic aux heures de pointe. À l'inverse du péage urbain qui fait payer le conducteur, un programme de lissage de pics stimule la responsabilité individuelle et récompense les gestes vertueux. Ces programmes, à forte dimension humaine et reposant sur le changement des comportements, permettent "d'effacer" des véhicules à certaines heures, sur un périmètre donné ».

À Rotterdam, la ville propose à ses habitants d'éviter de rouler en heure de pointe : décalage de l'horaire de départ, report modal, télétravail, covoiturage... L'automobiliste est récompensé (3€ par trajet évité par exemple) s'il prouve qu'il a trouvé une alternative pour son trajet (des caméras LAPI<sup>(1)</sup>, boîtiers connectés ou appli smartphone permettent d'enregistrer les trajets réalisés).

© MARC MONTAGNON  
2



## MARTIAL CHEVREUIL : PARCOURS

**Martial Chevreuil est Directeur business innovation du Groupe Egis, en charge du développement de nouvelles offres en rupture avec nos marchés habituels.**

**Ingénieur de l'École Centrale de Paris, il a débuté sa carrière au Ministère de l'Équipement et des Transports, Direction de la Sécurité et de la Circulation Routières, dans lequel il a passé 12 ans. Il a notamment été en charge du développement du modèle de prévision de trafic "Bison Futé", de la politique nationale d'information routière et du développement des nouvelles technologies dans les centres d'information routière.**

**Depuis 1989, date de son entrée dans le Groupe Egis, il a conduit de nombreux projets tant en France qu'au niveau international, concernant la mise en place de nouvelles technologies appliquées aux transports (Systèmes de Transport Intelligents - ITS).**

**Il est l'un des fondateurs d'ITS France et a présidé de 2008 à 2011 le Comité technique de l'AIPCR (Association Mondiale de la Route) sur l'exploitation des réseaux et l'ITS. Il préside depuis 2014 la Commission innovation de Syntec Ingénierie.**

**2- Martial Chevreuil, directeur Business Innovation au sein d'Egis et président de la commission innovation de Syntec Ingénierie.**

**3- Lissage des pics de trafic routier aux heures de pointe.**

Les résultats sont probants : le trafic à Rotterdam a baissé de 6% grâce à 12000 participants et près de 80% des participants ont conservé leurs bonnes habitudes après la fin du programme.

## CONTRÔLE AUTOMATISÉ DU STATIONNEMENT

Aux Pays-Bas toujours, Egis est chargé d'assurer l'exploitation des services de stationnement en voirie de la ville d'Amsterdam.

Le système de contrôle du stationnement d'Amsterdam - "Smart Parking" - est considéré aujourd'hui comme le plus performant au monde et l'un des plus innovants puisqu'il propose une gestion entièrement dématérialisée du contrôle au stationnement.

« Son principe repose sur des voitures équipées de caméras, qui scannent les plaques d'immatriculation des véhicules stationnés et envoient les données vers un système de traitement automatisé en back-office, explique Martial Chevreuil. Les droits de stationnement sont ensuite directement vérifiés auprès de l'opérateur, en coopération avec les autorités locales. Nous gérons ainsi environ 150 000 places de parking, 180 000 permis de stationnement numérisés pour les résidents et 2 400 parcètres. Ce système se développe actuellement en France avec la dépeçonnisation du stationnement ».

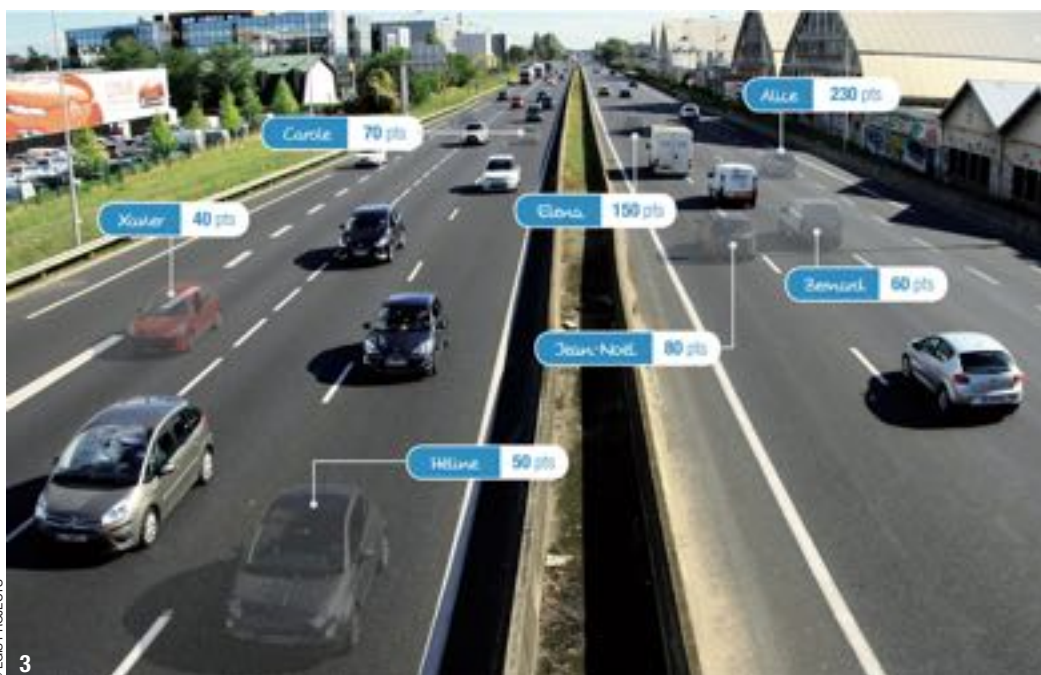
## ÉNERGIE / CLIMAT TÉLÉPHONIE MOBILE ET ÉOLIENNES

Afin d'adapter les territoires aux multiples impacts du changement climatique, Egis a développé une offre étendue en matière de limitation des impacts, d'adaptation et de résilience. Plusieurs projets sont en cours au nombre desquels Wind-it<sup>®</sup>.

« Wind-it<sup>®</sup> est une innovation technologique déterminante pour les sites de téléphonie mobile ne disposant pas d'accès à un réseau électrique fiable, estime Martial Chevreuil ».

Grâce à une exostructure unique à la géométrie brevetée, cette tour de télécommunication peut intégrer plusieurs éoliennes à axe vertical à haute efficacité sur des hauteurs allant de 35 à 70 m et est capable d'accueillir plusieurs opérateurs. Elle peut produire de l'énergie de façon autonome et, couplée à une installation solaire, permet aux opérateurs de téléphonie mobile de réduire considérablement - voire d'éviter - le recours à un groupe électrogène alimenté au gasoil. La tour Wind-it<sup>®</sup>, entièrement modulable, peut être dimensionnée de manière à produire des excédents d'énergie et contribuer ainsi à l'électrification locale.

« Wind-it<sup>®</sup> a remporté le prix Industrie et Conseil en Technologie au Grand Prix National de l'Ingénierie 2015, précise Martial Chevreuil. Après un premier contrat remporté à Madagascar, Wind-it<sup>®</sup> a signé en 2016 avec Orange l'installation de deux systèmes d'éolienne verticale au Luxembourg ». Une solution pour couvrir les zones blanches ? ▷



© EGIS PROJECTS  
3





4

## LA RUE DE DEMAIN

Pour éviter que l'espace public ne devienne obsolète par son incapacité à évoluer au bon rythme, le groupe Egis a mis au point une démarche de conception qui rend l'espace public évolutif et dynamique : la rue intelligente et partagée.

Basée sur l'affectation dynamique des espaces de la rue, la solution de rue partagée est particulièrement adaptée aux espaces fortement contraints, au sein desquels s'expriment des usages a priori antagonistes et de forte intensité.

Elle permet de concilier les usages et les capacités circulatoires de la rue et repose sur l'affectation variable de l'espace, selon les différentes temporalités d'usages.

Aux États-Unis, la technique des voies réservées à certaines heures et à certains véhicules est déjà utilisée dans des villes comme Chicago et Los Angeles, mais la démarche "la rue de demain" va plus loin : à Lyon, une expérimentation est en cours dans la rue Lacassagne visant à ouvrir la circulation sur la voie de bus aux automobilistes, à l'aide d'une signalisation spécifique, lorsque qu'il n'y a pas de bus, de façon à optimiser l'infrastructure existante.



5

## PILOTER ET MAÎTRISER L'ÉNERGIE

Dans le domaine de l'énergie et du climat, plusieurs innovations sont à mettre à l'actif d'Egis.

Sobre est une plateforme collaborative pour le pilotage et la maîtrise des énergies. Poste Immo, la Caisse des Dépôts et Egis se sont associés pour créer une société commune au service de la transition énergétique : Sobre.

Après une phase d'expérimentation sur les parcs des groupes actionnaires, elle propose des solutions concrètes aux utilisateurs professionnels de l'immobilier pour le pilotage et la baisse des consommations d'énergie.

« Dans un contexte d'urgence climatique, de contraintes réglementaires croissantes, et d'inflation tendancielle des prix des énergies, précise Martial Chevreuil, Sobre permet aux collectivi-

tés territoriales et aux entreprises privées de maîtriser la facture énergétique de leur patrimoine immobilier, sans toutefois alourdir outre mesure leur budget d'investissement ».

Dans cette perspective, le service fourni par Sobre adressera les gisements d'économie les moins coûteux en termes d'investissement : promotion des comportements économes pour les usagers des locaux, amélioration de l'exploitation technique des équipements, petits travaux de rénovation, etc.

## S'ADAPTER AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'adaptation au changement climatique est à l'origine de plusieurs projets. Gerici, lancé en 2008 était précurseur : il offre une solution pour adapter les infrastructures à ce changement en identifiant leurs vulnérabilités et en éva-

### 4- Contrôle automatisé du stationnement « Smart Parking » à Amsterdam.

### 5- Gestion dynamique des voies de bus rue Lacassagne, à Lyon.

cise Martial Chevreuil : l'A1 pour la Société des Autoroutes du Nord et de l'Est de la France (Sanef) et l'A7 entre Lyon et Orange pour les Autoroutes du Sud de la France (ASF). »

Une étude pilote pour RFF (Réseau Ferré de France) sur le réseau du Sud-Ouest a également été conduite.

Il a été poursuivi dans le cadre européen : projets RIMARROC<sup>(2)</sup>, ROADAPT<sup>(3)</sup> et aujourd'hui WATCH, concernant la résilience des réseaux hydrauliques des routes.

## ANTICIPER LA CHUTE DE BLOCS

Egis est également impliqué dans le projet national collaboratif C2ROP dont l'objectif est d'apporter des réponses concrètes, fiables et innovantes sur la problématique des risques rocheux et des chutes de blocs dans les zones à risque. Il réunit au sein du cluster Indura

luant les risques climatiques auxquels elles sont soumises.

Couplée à un système d'information géographique (SIG), cette démarche méthodologique évalue la capacité d'adaptation des systèmes étudiés (résilience) et identifie les mises à niveau nécessaires.

« Cette solution a été testée sur deux sections autoroutières en France, pré-

(Infrastructures Durables Rhône- Alpes) une cinquantaine de partenaires qui partagent, pour la première fois au niveau national, leurs connaissances et savoirs sur la problématique des risques rocheux. Ils sont maîtres d'ouvrage, ingénieristes, entrepreneurs de travaux, chercheurs-académistes, industriels.

### CYCLE UP : RÉEMPLOYER LES MATÉRIAUX

Avec Cycle Up qui vient d'être lancé, Egis propose de stimuler le réemploi de matériaux en mettant en relation les opportunités de valorisation des matériaux issus des opérations de déconstruction et rénovation et les projets neufs. À cet effet, l'entreprise a créé une banque de données qui met en relation des maîtres d'ouvrage, des concepteurs et des entreprises et leur fournit une aide pour vérifier la qualité des matériaux.

Pour être complet dans le chapitre "énergie/climat", il convient de citer également deux démarches originales : Clim'Elioth et Vetiver.

Clim'Elioth est un outil d'écoconception qui permet d'évaluer les besoins et dépenses énergétiques d'un bâti-

ment, mais aussi de proposer et d'optimiser des options architecturales et techniques dès la phase conception : ventilation naturelle, climatisation, puits canadiens... Il implémente aisément l'ensemble des paramètres d'entrée du projet, effectue un calcul rapide et traite de manière pertinente les résultats, dans le but de pouvoir apprécier les multiples solutions architecturales et techniques du projet d'un point de vue énergétique.

Vetiver permet d'éviter des solutions de protections lourdes, onéreuses et impactant le paysage, et contribue à l'amélioration des conditions de vie des habitants. Il consiste à disposer en plants serrés du vétiver, une plante aux racines profondes (3 à 4 m) permettant de lutter contre l'érosion des sols et de stabiliser les talus routiers. Cette technique a été utilisée avec succès à Brazzaville au Congo, sur le projet de la Route Nationale 1.

### BIODIVERSITÉ

#### BIODIVERSITÉ : DES SOLUTIONS POUR COMPENSER LES PERTES

Dans le domaine de la biodiversité, afin d'éviter, de réduire et de compenser les pertes et les tensions qui appauvrissent de nombreux territoires, Egis met en œuvre plusieurs solutions : Bat3data®, Eco-récifs, Aulnes et Optiflux.

Bat3data® est un outil de cartographie 3D pour venir au secours des chiroptères. Afin de contribuer à leur préservation, il permet d'identifier les espèces de chauves-souris, de suivre et de cartographier leurs trajectoires. Cet outil a été testé avec succès sur les autoroutes A406 (au sud de Mâcon) et A65, reliant Langon à Pau.

Pour développer les fonctionnalités écologiques des aménagements maritimes, via sa filiale Seaboost, Egis a développé des équipements sous-marins permettant de valoriser la dimension écologique de tout ouvrage portuaire, ▷

**6- Exostructure de Tour « Wind-it® » : téléphonie mobile et éoliennes.**

**7- S'adapter au changement climatique.**

**8- Le projet national C2ROP apporte des réponses à la problématique des risques rocheux et des chutes de blocs.**



© SCHUTTERSTOCK  
6



7  
© THINKSTOCK



8  
© SNCF



## PRÉSENCE SUR ITER

Egis est évidemment présent sur ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), projet expérimental reposant sur la création d'une centrale d'un nouveau genre, basée sur la fusion nucléaire. Il s'agit du plus ambitieux projet énergétique au monde<sup>(1)</sup>.

ITER vise à reproduire sur Terre - et de manière contrôlée - les réactions de fusion nucléaire à l'origine de l'énergie du soleil et des étoiles. La recherche sur la fusion pourrait représenter une variante durable à tous les modes actuels de production d'énergie, en développant une source d'énergie sûre, inépuisable et respectueuse de l'environnement.

Le programme consiste à bâtir les infrastructures de la plateforme d'un demi-hectare, réalisées par l'agence européenne F4E (Fusion for Energy), soit une quarantaine de bâtiments à caractère industriel, ainsi que deux bâtiments nucléaires : l'un accueillant le Tokamak (un réacteur expérimental de 30 m de haut pesant 25 000 t), l'autre une usine de préparation et de retraitement d'un isotope de l'hydrogène, le tritium.

ITER a reçu le prix " Industrie et conseil en technologie " lors de la 11<sup>e</sup> édition du Grand Prix national de l'ingénierie 2017 décerné par le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD).

1- ITER : le projet est porté par le consortium ENGAGE (Egis / Assystem / Atkins / Empresarios Agrupados) qui assure depuis 2011 et jusqu'en 2018 la mission d'architect engineer, qui comprend l'assistance au maître d'ouvrage et la maîtrise d'oeuvre tous corps d'état pour la construction de l'ensemble du site.



© ITER ORGANISATION 9

littoral ou off-shore par une démarche d'écoconception.

« Plusieurs dispositifs ont déjà été conçus, indique Martial Chevreuil, permettant d'améliorer nettement le potentiel d'accueil de la vie sous-marine. C'est le cas des éco-récifs Roselière et Oursin, des solutions de micro-habitats adaptés à la faune et à la flore en milieu marin basées sur le biomimétisme. Seabooast a déjà déployé ses dispositifs en Méditerranée, en mer du Nord, dans la Manche et dans l'océan Indien ».

Avec Aulnes, l'objectif est de cartographier la valeur des services produits par la nature et de diminuer les pertes de biodiversité.

Développé après 4 ans de recherche en partenariat avec le LAMETA<sup>(4)</sup>, Aulnes permet la spatialisation des services rendus par les écosystèmes et l'évaluation de la perte engendrée (valeur économique, environnementale voire sociétale).

Quant à Optiflux, il s'agit d'un outil d'analyse spatiale des flux biologiques de faune pour prendre en compte les trames vertes et bleues dans les projets d'infrastructures. Il a été conçu et développé dans le but de prédire et de visualiser les effets de l'implantation d'une infrastructure linéaire sur l'occupation des territoires et la viabilité des peuplements d'animaux concernés. Il permet aussi de tester la pertinence du positionnement des ouvrages pour le rétablissement de ces flux et donc

d'optimiser leur emplacement et leur nombre.

« Cet outil n'a pas d'équivalent à ce jour, précise Martial Chevreuil. Il a fait ses preuves sur de nombreux projets d'infrastructures : Route Centre Europe Atlantique, LGV Rhin Rhône, LGV Poitiers Limoges, projet A304, Autoroute A28, Autoroute A63... Il permet de répondre aux exigences du Grenelle en matière de trame verte et bleue, et de maintien des corridors biologiques avec des milieux non fragmentés ».

### VILLE DURABLE : UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE

Pour la ville durable, l'approche d'Egis se veut avant tout systémique, sans raisonner en silos, afin de mettre en

### 9- Présence sur ITER.

10- « Bat3data<sup>®</sup> » récompensé lors de Pollutec 2014.

place des services qui s'appuient sur les différents services fonctionnels. Plusieurs réalisations mettent en lumière l'intervention de l'entreprise autour de l'idée de la ville durable.

### PARIS NEUTRE EN CARBONE EN 2050 ?

En prévision de la future révision de son Plan Climat, la Ville de Paris a mené

une étude stratégique pour la réalisation d'une vision décarbonée de Paris d'ici 2050.

Le groupement Elioth (une entité du groupe Egis), mandataire associant les équipes Conseil d'Egis, Quattrolibri (conseil en stratégies bas carbone) et Mana (bureau d'études et de conseil sociologiques), l'a assisté dans cette réflexion, permettant ainsi à la Ville de Paris de disposer d'une vision extérieure, indépendante et impartiale des problématiques à prendre en considération.

Les mesures proposées par le groupement doivent permettre d'ouvrir le débat pour une transition vers une ville bas carbone et donner une vision partagée par l'ensemble de ses habitants. Quant à "Métabolisme Paris", il s'agit d'une application interactive développée par Elioth, pour le compte de la Mairie de Paris afin de populariser le concept de métabolisme urbain auprès des décideurs politiques, des porteurs de projet et des citoyens.

Pour satisfaire ses besoins, la ville utilise et transforme des ressources, génère des flux entrants et sortants d'énergies, de matières et d'eaux.

Leur analyse permet de mieux comprendre l'interaction de la ville avec son environnement : combien d'électricité, de gaz, de pétrole, de chaleur, de biens de consommation, de nourriture et d'eau potable entrent dans Paris chaque année ? Est-ce que la



10

© MEDDE - LAURENT MIGNAUX





11

© SEABOOST

ville exporte plus de produits que de déchets ? À quel point est-elle dépendante des imports d'énergie ?

La ville durable, c'est aussi la conception d'ouvrages emblématiques. Par exemple, la Philharmonie de Paris, dont l'architecture est signée Jean Nouvel, concrétise une alliance parfaite entre la structure, l'acoustique et les fluides. « Ce grand ensemble dédié à la

**11- Exemples d'éco-récifs Seaboost.**

**12- Vision décarbonée de Paris en 2050.**

musique, précise Martial Chevreuil, a bénéficié, dès sa conception, d'une expertise technique hors normes. La grande salle de concert, en particulier, a nécessité une synergie entre tous les lots techniques notamment structure complexe et innervation des fluides, rendue particulièrement difficile à mettre en œuvre en raison des contraintes acoustiques excep-

tionnelles. Seulement 32 m séparent le chef d'orchestre du spectateur du dernier rang ! ».

Egis a d'ailleurs été doublement récompensé pour cette réalisation : au sein de la maîtrise d'œuvre, elle a assuré l'ingénierie technique des lots fluides et structure, ainsi que le suivi des travaux et des visas des plans d'exécution. Un défi relevé avec brio par ses équipes, qui ont reçu le Prix Construction et Aménagement du Grand Prix National de l'Ingénierie 2014 ainsi que le prix " Outstanding Project of the Year " aux FIDIC Awards 2015.



### DES OUTILS DE MISE EN ŒUVRE ADAPTÉS

L'ensemble de ces innovations, déjà effectives ou encore au stade de projet, s'appuient sur des outils et des méthodes d'ingénierie conçues et développées par Egis pour faciliter le travail des opérationnels sur les projets. Au premier rang d'entre elles, se situe l'approche qu'Egis a fait du BIM (Building Information Modelling), devenu un standard de production de l'entreprise pour la réalisation de tous les projets qui lui sont confiés.

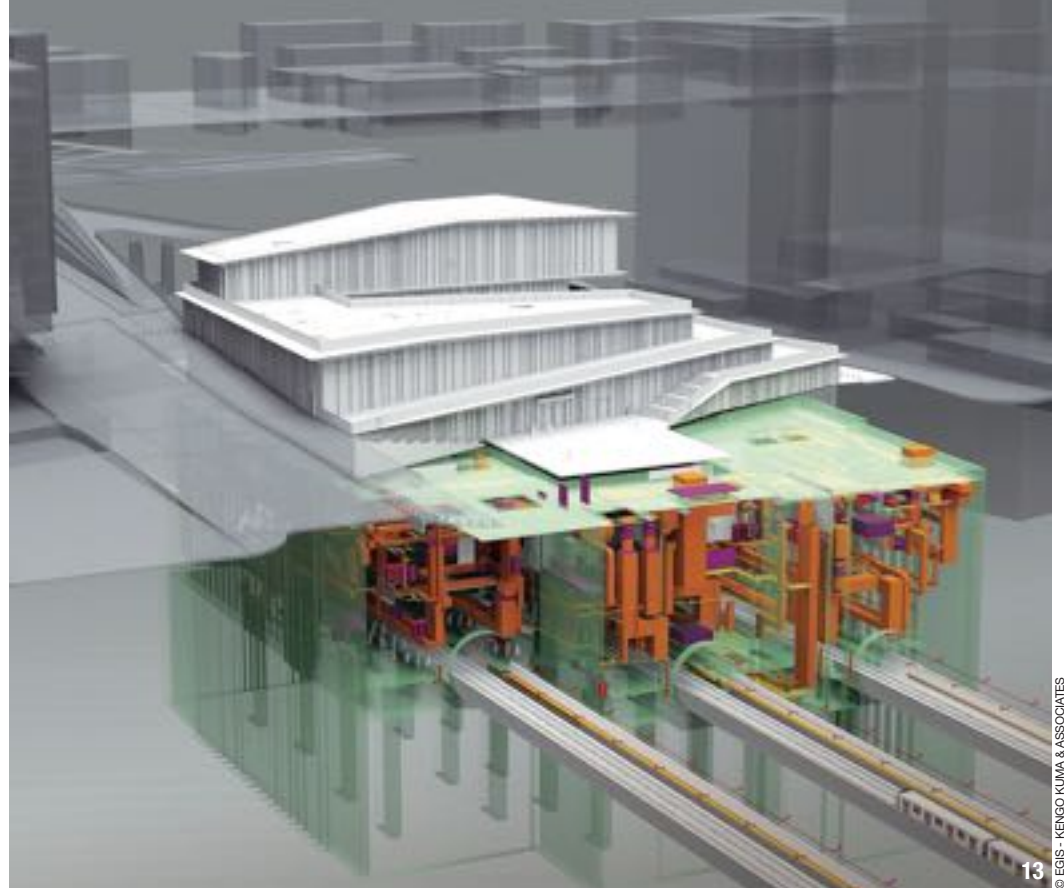
Pionnier dans la recherche, la formation et la promotion du BIM auprès de ses partenaires, le Groupe développe aujourd'hui des applications de la maquette numérique dès la phase amont jusqu'à la maintenance et l'exploitation des ouvrages.

© DIANE BERG  
12



À noter qu'Egis, la Société du Grand Paris et leurs partenaires ont été récompensés du BIM d'Or 2017 dans la catégorie projet d'infrastructures pour leur travail collaboratif autour du BIM sur la future Ligne 16 du Grand Paris Express. Dans le domaine routier, partant du constat que les infrastructures routières sont à l'origine de plus de 70 % des émissions de carbone liées au secteur des transports et pour maîtriser ces émissions, Egis a mis au point un éco-comparateur de variantes routières, Variways®, qui permet d'évaluer l'impact carbone d'une infrastructure routière lors des phases de construction et d'exploitation au travers de deux indicateurs : les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation d'énergie.

« Cette approche globale est unique sur le marché, précise Martial Chevreuil : grâce à des indicateurs chiffrés, pour une prise de décision au plus près des besoins, Variways® quantifie les émissions de GES et la consommation énergétique en fonction des paramètres du projet liés à la construction (terrassements, nature des ouvrages, structure de chaussée, etc.) et à l'exploitation (profil géométrique, trafic, vitesse) ». Afin d'anticiper sur l'obligation à venir



13

© EGIS - KENGO KUMA & ASSOCIATES

d'immatriculation des drones d'une certaine taille, la start-up Airborne Concept a développé avec le groupe Egis une balise, véritable carte d'immatriculation électronique permettant la visualisation d'un mini-drone sur les écrans du contrôle aérien de la Direction générale de l'Aviation Civile (DGAC) grâce à l'intégration d'un émetteur ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) sur un drone multirobot.

**13- Projet de couverture de Saint-Denis (architecte : Kengo Kuma & Associates).**  
**14- « Varyways® » permet d'évaluer l'impact carbone d'une infrastructure routière.**

Un premier vol de mini-drone a été organisé à l'aéroport de Toulouse. L'opération a rencontré un franc succès et permet à la DGAC d'identifier les drones dans l'espace aérien, au même titre que les avions. Ce concept ingénieux répond à un besoin d'exercer une surveillance et de faciliter la détection de drones en temps réel et ainsi de faire face aux survols illégaux.



14

© EGIS - KENGO KUMA & ASSOCIATES



© ROBERT MANDEL

15

Il permet par ailleurs de réaliser, avec ce drone, entre deux passages d'avion, des inspections de pistes aéroportuaires sans avoir à interrompre le trafic. □

- 1- Lecture Automatisée de Plaque d'Immatriculation.
- 2- Risk management for roads in a changing climate.
- 3- Roads for today, adapted for tomorrow.
- 4- LAMETA : Laboratoire Montpellierain d'Économie Théorique et Appliquée.

15- Airborne Concept a développé avec le groupe Egis une balise permettant la visualisation d'un drone sur les écrans du contrôle aérien de la DGAC.

## L'INGÉNIERIE INDÉPENDANTE EN BREF

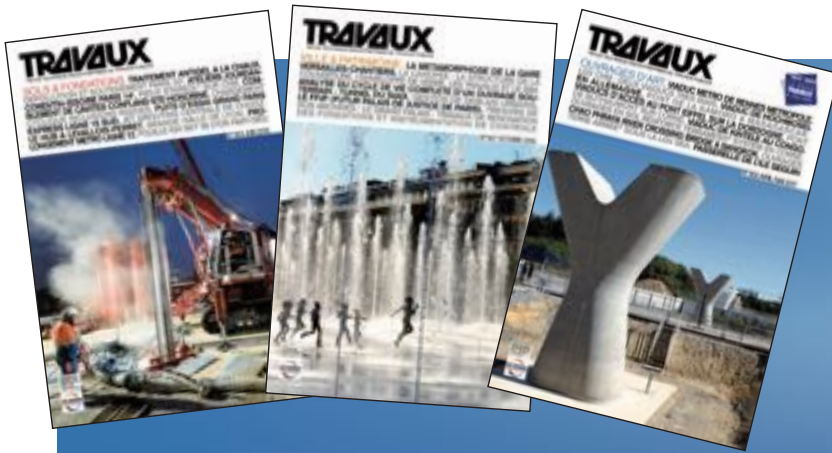
L'ingénierie française totalise 40 milliards d'euros de chiffre d'affaires annuel et compte 350 000 emplois dont 50 % d'ingénieurs.

Il s'agit de 41 000 sociétés qui opèrent dans les domaines de la construction (bâtiment, infrastructure, aménagement du territoire, transports-mobilité et de l'Industrie).

L'ingénierie contribue à relever les défis actuels dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable en apportant son savoir-faire et ses solutions ingénierie systèmes dans des projets présentant de nombreuses interfaces. Elle est bien placée pour apporter sa contribution aux politiques publiques en faveur de l'innovation, particulièrement dans le cadre des Programmes d'Investissement d'Avenir (PIA) ou de H2020 au niveau européen.

L'innovation est au cœur des projets qui doivent concilier de nouvelles technologies, des systèmes d'information, des techniques innovantes de construction et bien prendre en compte les usages. Les projets dans la ville durable et intelligente, dans les transports intelligents, le véhicule connecté ou autonome en sont de parfaits exemples.

L'un des objectifs de la commission "innovation" de Syntec Ingénierie est de promouvoir la capacité de l'ingénierie à apporter des solutions innovantes, et cela passe en particulier par des propositions pour faire évoluer la commande publique afin de favoriser l'innovation notamment au niveau des missions de maître d'œuvre.



**TRAVAUX**  
REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**Retrouvez l'actualité de la profession, les chantiers en images, les interviews des grands décideurs, le point de vue des ingénieurs. Pour réserver votre emplacement publicitaire dans Travaux, contactez :**

### Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 942 « Sols et fondations »
- TRAVAUX n° 943 « Énergie »



**Bertrand COSSON**

Tél. 01 42 21 89 04

[b.cosson@rive-media.fr](mailto:b.cosson@rive-media.fr)







# INNOVATION ET HYDROFRAISES

AUTEURS : JEAN-FRANÇOIS MOSSER, DIRECTEUR RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT, SOLETANCHE BACHY -  
STÉPHANE MONLEAU, DIRECTEUR COMMERCIAL ET MARKETING, SOLETANCHE BACHY FRANCE -  
FRANÇOISE ROUMÉGOUX, RESPONSABLE FORMATION, SOLETANCHE BACHY

DEPUIS SON INVENTION DANS LES ANNÉES 1970 PAR SOLETANCHE BACHY, L'HYDROFRAISE EST DEVENUE L'OUTIL INCONTOURNABLE POUR LA PERFORATION DES PAROIS MOULÉES. CES DERNIÈRES ANNÉES, LES DÉVELOPPEMENTS SE SONT ACCÉLÉRÉS POUR RÉPONDRE AUX BESOINS CROISSANTS DES CLIENTS ET À DES PROJETS DE PLUS EN PLUS AMBITIEUX : EMPRISES LIMITÉES, PROFONDEUR ET ÉPAISSEUR ACCRUES, AINSI QUE TOLÉRANCES DE VERTICALITÉ RÉDUITES.

## UN PEU D'HISTOIRE

Le développement de la paroi moulée, dans les années 1960, a apporté un progrès considérable dans les fondations profondes : fiabilité de l'étanchéité et du soutènement, et surtout possibilité d'intégrer directement la fondation et/ou le soutènement dans la structure du bâtiment - un atout important pour la construction de parkings, stations de métro et tranchées couvertes.

Les premiers outillages de creusement sont des bennes à câbles, avec des performances limitées :

- Un rendement de perforation faible ;
- Peu de moyens pour contrôler la trajectoire de l'outil, un contrôle de verticalité sommaire ;
- Et surtout, l'obligation d'utiliser des trépan lorsque le sol devient trop difficile à forer.

En contexte urbain, la construction de parois moulées ne passe pas inaperçue : transports de matériaux excavés pollués par la boue, vibrations induites



1- HC05 au barrage de Subansiri (Inde).

2- Forage de la paroi moulée de la station RER Gare-de-Lyon (1974).

1- HC05 at the Subansiri Dam (India).

2- Drilling the diaphragm wall of the Gare-de-Lyon "RER" station (1974).

par les coups de benne et surtout par les chutes de trépan.

L'invention de l'outillage Hydrofraise par Soletanche, dans les années 1970, a représenté un véritable saut technologique.

La perforation est désormais assurée par deux paires de tambours rotatifs munis de pics, permettant de forer tous les types de terrain sans recourir à la technique du trépanage.

La haute taille du châssis de l'Hydrofraise et la perforation en rotation assurent une grande stabilité de la trajectoire de l'outillage et d'excellentes performances en termes de verticalité. Enfin, les déblais sont évacués par la boue, puis traités dans une station de dessablage, ce qui permet d'évacuer les matériaux plus proprement.

Depuis sa première utilisation en 1974 sur la station RER de la Gare de Lyon (figure 2), l'Hydrofraise a connu un succès considérable et a été imitée par l'ensemble de la profession, devenant alors un standard du marché.

Plusieurs générations d'Hydrofraises ont été développées pour répondre aux exigences croissantes des grands projets internationaux d'infrastructures en termes d'épaisseur de la paroi (2200 mm sur le pont Akashi au Japon en 1990, 1800 mm sur le barrage de Wolf Creek aux États-Unis en 2008-2012 ou les puits de Lee Tunnel à Londres en 2011 - figures 3, 4 et 5) et de profondeur (plus de 120 m de profondeur pour le barrage de Mud Montain aux États-Unis en 1990 ou les Tours Petronas à Kuala Lumpur en Malaisie en 1993).

© SOLETANCHE BACHY

2



## UNE GAMME ÉTENDUE D'HYDROFRAISES

Ces dernières années, 3 nouvelles familles d'Hydrofraises ont été développées pour répondre à des besoins différents :

- Le forage sous hauteur réduite ;
- Le forage en site urbain ;
- Le forage du terrain très dur.

### HYDROFRAISES POUR HAUTEUR LIMITÉE : HC05

Après les premières générations d'Hydrofraises compactes (Latine et HC03), la gamme Hydrofraise, avec HC05, s'est enrichie d'une nouvelle référence permettant de travailler sous hauteur limitée et se transportant aisément. Son atout numéro 1 consiste dans sa compacité. Conçue par les équipes de Soletanche Bachy, elle peut être expédiée partout dans le monde en trois conteneurs de 40 pieds et trois autres de 20 pieds. Elle se caractérise également par des temps de montage et de démontage réduits (3 jours). Elle est capable d'effectuer des forages jusqu'à 50 m de profondeur pour une épaisseur de 630 à 1 500 mm, le tout sous une hauteur limitée de 5,30 m.

Cette Hydrofraise a été lancée sur le projet de couverture des voies de la ZAC Clichy-Batignolles avant de rejoindre le barrage de Subansiri en Inde, où elle a été amenée à travailler dans des galeries de 7 m de tirant d'air pour réaliser 18 000 m<sup>2</sup> d'écran étanche à 50 m de profondeur (figure 1). Elle a depuis été produite en plusieurs exemplaires et déployée en France et en Asie. Elle a récemment été utilisée avec succès, sous un tablier auxiliaire de la SNCF, dans le cadre des travaux de la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (Ligne 15 Sud du Grand Paris Express - figure 6).

### HYDROFRAISES URBAINES : XS

L'Hydrofraise XS (figure 7) est un modèle de gabarit réduit, mais néanmoins puissant et performant, spécialement destiné aux chantiers urbains. Alors que l'Hydrofraise classique est montée de façon pendulaire sur des grues à chenilles de plus de 130 t, le modèle XS équipe une foreuse de pieux d'environ 60 t par l'intermédiaire d'un kelly (mât). Ce mode de suspension apporte à l'outillage plusieurs avantages décisifs :

- Le poids du kelly s'ajoute à celui de l'outil ; de plus il, est possible d'appliquer une poussée sur le kelly. Ces deux facteurs permettent d'augmenter de façon très importante le poids exercé sur l'outil, donc son



3

© SOLETANCHE BACHY



4



5

© SOLETANCHE BACHY

rendement de perforation dans tous les terrains, et sa capacité à forer les terrains durs.

- Le kelly assure un guidage de l'outil sur toute la hauteur de la paroi, ce qui améliore ses performances en termes de verticalité.
- Il permet également de réduire les frais de transport du matériel et d'accélérer la mise en route des travaux.

Cette machine, qui peut descendre jusqu'à 25 m de profondeur, a également l'avantage de pouvoir réaliser des parois de 500 mm d'épaisseur (contre 630 mm pour le matériel standard) - une particularité intéressante pour les fouilles urbaines, où elle permet de

**3- Barrage de Wolf Creek (USA 2008-2012).**

**4- Hydrofraise au pont Akashi (Japon 1990).**

**5- Hydrofraise Evolution sur projet de Lee Tunnel (Royaume Uni 2011).**

**3- Wolf Creek Dam (USA 2008-2012).**

**4- Hydrofraise at Akashi Bridge (Japan 1990).**

**5- Evolution Hydrofraise on the Lee Tunnel project (United Kingdom 2011).**

créer des places de parking supplémentaires. L'Hydrofraise XS est par ailleurs au cœur de l'offre Cit'Easy, lauréat du Trophée des TP 2013, pour la réalisation des parois moulées en site urbain.

### HYDROFRAISE À GRIPPEURS

Dernière-née dans la famille, l'Hydrofraise à grippeurs renouvelle le procédé de la paroi moulée en proposant un nouvel outillage capable de forer à plus de 70 m de profondeur avec une poussée de plus de 120 t sur les outils de coupe, alors que le poids suspendu n'est que de 45 t. Cela est possible grâce à une nouvelle conception de l'outil en deux modules :





6

© CÉDRIC HELSLY

→ Un module d'ancrage qui, grâce à des gripeurs, s'ancre sur le terrain pendant le forage, ce qui permet de mobiliser un frottement latéral important ;

→ Un module de forage coulissant par rapport au module d'ancrage.

Deux puissants vérins sont montés entre les deux modules : ils s'appuient sur le module d'ancrage, une fois celui-ci grippé dans le terrain, pour exercer une poussée de 120 t sur le module de forage.

Ce fonctionnement est inspiré de l'Hydrofraise XS qui, par l'intermédiaire de son kelly, stabilise l'outil de coupe, ainsi

**6- HC05 sur Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (Ligne 15 Sud du Grand Paris Express).**

**7- Hydrofraise XS sur RER A à Nanterre Université.**

**6- HC05 on Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (Line 15 South of the 'Grand Paris Express' project).**

**7- XS Hydrofraise on RER A at Nanterre University.**

que des tunneliers à gripeurs, qui se grippent sur le rocher de manière à augmenter la poussée sur la roue de coupe pour pouvoir pénétrer dans des roches très dures.

La conception de l'Hydrofraise à gripeurs a dû faire face à deux défis majeurs :

→ Un défi géotechnique : s'ancreur sur les parois du panneau en cours de forage pour reprendre des efforts de plus de 120 t, sans provoquer l'éboulement du panneau. À la différence des tunneliers à appui radial, qui se grippent dans du rocher, l'Hydrofraise à gripeurs

sera amenée à se gripper dans des terrains meubles qui recouvrent les sols indurés.

→ Un défi mécanique : assurer une verticalité aussi bonne, voire meilleure, que pour les Hydrofraises conventionnelles et ce malgré le grippage du module d'ancrage dans le sol.

Le premier point a fait l'objet d'une étude approfondie de différents profils géotechniques à travers le monde, pour définir la surface de grippage nécessaire pour assurer une reprise d'efforts de poussée allant jusqu'à 200 t.

Le deuxième point a requis la conception de caissons d'ancrage spécifiques permettant une translation horizontale du module de forage par rapport au caisson, de manière à ce que les plaques de grippage puissent s'adapter aux contours du sol sans provoquer la déviation de l'Hydrofraise.

L'Hydrofraise à gripeurs a été utilisée avec succès en région parisienne dans le cadre du prolongement Nord de la Ligne 14 (figure 8). Elle a ensuite été utilisée sur des stations de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express : Les Ardoines (figure 9) et Le-Vert-de-Maisons.

L'Hydrofraise à gripeurs est lauréate du Trophée des TP en 2016 et fait l'objet de quatre dépôts de brevets en France et à l'International. Elle sera bientôt exportée dans le Sud-Est Asiatique où les terrains granitiques l'attendent avec impatience.



7

© CÉDRIC HELSLY



## DES DÉVELOPPEMENTS DURABLES POUR FACILITER L'UTILISATION DE L'HYDROFRAISE

### SIMULATEUR D'HYDROFRAISE

Le pilotage des Hydrofraises est d'une grande complexité. Jusqu'à présent, la formation de nos opérateurs grutiers Hydrofraise s'effectue exclusivement en cours de production, en tutorat avec un grutier confirmé, ce qui ne permet, ni d'aborder tous les scénarios, ni de rencontrer tous les aléas de forage. Or, la perspective du Grand Paris Express en particulier obligeait à former davantage d'opérateurs dans un délai très court. Soletanche Bachy a donc mis au point, en partenariat avec Acreos, un simulateur numérique ultra-perfectionné de forage de parois moulées à l'Hydrofraise (figure 10).

Caractéristiques des sols, comportements de la machine (vrillage, blocage ...), sensations (siège dynamique) ... toutes les conditions de terrain, reproduites numériquement dans une cabine de pilotage, sont très proches de la réalité.

Avec le simulateur de conduite d'Hydrofraise, les temps de formation sont considérablement réduits, les coûts diminués, et le nombre de personnes formées est augmenté. Les erreurs de pilotage n'ayant pas de conséquences réelles sur le chantier, les apprentis peuvent recommencer à l'envi les exercices les plus complexes dans des conditions de site extrêmes.

Dix modules interactifs, intégrant pour chacun un nombre d'exercices prédéfini, permettent au stagiaire de se confronter à tous types d'aléas. Les modules pédagogiques de forage sont aussi utilisés comme perfectionnement ou rappel pour les opérateurs aguerris. Ce simulateur est par ailleurs installé dans un container qui peut être directement installé sur chantier.

La proximité du simulateur avec les outils de forage en exploitation permet d'alterner alors les séances de simulation et de forage réel.

Fort du succès de ce premier simulateur, Soletanche Bachy a depuis fait le choix de l'adapter au forage à la benne et ce, dans de multiples langues de manière à l'exporter sur les filiales étrangères.

Le groupe dispose désormais d'un outil qui permet de valider les acquis de manière plus certaine.

### POWER PACKS ÉLECTRIQUES

Afin de répondre à des exigences environnementales de plus en plus élevées,



8  
© CÉDRIC HELSLY

Soletanche Bachy a mis au point une Hydrofraise alimentée électriquement : le power pack, organe fournissant la puissance hydraulique pour les moteurs des outils de coupe et la pompe de remontée des déblais, est directement alimenté électriquement. L'électricité est prélevée sur un réseau haute tension pour être ensuite transformée en 400 V sur chantier.

Cette Hydrofraise (figure 11), utilisée pour réaliser des puits sur le projet de

**8- Hydrofraise à grippers sur L14.**

**9- Hydrofraise à grippers sur Les-Ardoines.**

**8- Hydrofraise with grippers on Line L14.**

**9- Hydrofraise with grippers on Les-Ardoines station.**

Thames Tideway Tunnel est, non seulement plus respectueuse de l'environnement, mais aussi plus silencieuse que les modèles conventionnels avec un fonctionnement thermique.

### UNITÉ DE DESTRUCTION DE BOUE PAR HYDROCYCLONAGE

Au cours du creusement, la densité de la boue de forage croît inévitablement du fait de l'apport de fines contenues dans les déblais.

Pour conserver une boue toujours conforme aux exigences du forage, il est indispensable de la traiter en permanence. Cependant, en moyenne, après 2 ou 3 cycles de traitement, les qualités de la boue sont trop dégradées pour pouvoir autoriser sa réutilisation. Il faut alors la remplacer par une boue neuve.

La boue usagée est alors généralement évacuée sous forme liquide. Mais cette pratique pose bien des problèmes, aussi bien logistiques (transport) que réglementaires (mise en décharges spécifiques). Elle peut sinon être détruite sur place, mais les solutions existantes, soit sont coûteuses, comme l'utilisation de centrifugeuses, soit requièrent de l'espace, comme l'utilisation de filtres-presses.

Soletanche Bachy a développé une unité compacte de destruction de boue par hydrocyclonage qui permet de s'affranchir des contraintes des technologies ci-dessus.



9  
© CÉDRIC HELSLY

- 10- Simulateur de conduite d'Hydrofraise.
- 11- Hydrofraise avec powerpack électrique sur Thames Tideway Tunnel (Royaume Uni).
- 12- Unité DHF de destruction de boue.

10- Hydrofraise operating simulator.

11- Hydrofraise with electric power pack on Thames Tideway Tunnel (UK).

12- DHF sludge destruction unit.



© SOLETANCHE BACHY

10

Dans ce procédé breveté, la boue est traitée par coagulation, puis floculation, avant d'être déshydratée à l'aide d'hydrocyclones.

La centrale est composée de 2 modules de la dimension d'un conteneur de 20 pieds. Elle est facile à installer et parfaitement adaptée aux besoins des chantiers de paroi moulée urbaine.

En fin de vie, la boue usagée est donc détruite : on rejette l'eau de la boue traitée au réseau et on récupère la partie solide pour l'évacuer comme un déblai solide. L'impact sur l'environnement est alors réduit au minimum. Elle a été utilisée pour la première fois sur la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express (figure 12).

### CONCLUSION

L'Hydrofraise de Soletanche Bachy se réinvente donc en permanence pour apporter rapidement des solutions aux clients dont les projets sont de plus en plus complexes. Quelle que soit la taille de l'Hydrofraise, l'accroissement de la productivité dans le respect de l'environnement, ainsi que la maîtrise

de la verticalité du forage, demeurent deux exigences qui guident ses développements.

Les équipes de Soletanche Bachy travaillent actuellement sur de nouvelles solutions pour étendre les avancées des dernières années et permettre ainsi à l'Hydrofraise de rester la référence en forage de parois moulées. □



11

© TIDEWAY - IMAGE2



12

© SOLETANCHE BACHY

### ABSTRACT

#### INNOVATION AND HYDROFRAISES

JEAN-FRANÇOIS MOSSER, SOLETANCHE BACHY - STÉPHANE MONLEAU, SOLETANCHE BACHY - FRANÇOISE ROUMEGOUX, SOLETANCHE BACHY

Since its invention by Soletanche Bachy in the 1970s, the Hydrofraise (hydro-cutter) has become the indispensable tool for drilling diaphragm walls. In recent years, development has accelerated to meet the growing needs of customers for increasingly ambitious projects: limited available space, greater depths and thicknesses, and reduced verticality tolerances. We have thus seen the advent of compact and urban Hydrofraises and, recently, Hydrofraises provided with grippers. At the same time, certain innovations contributing to sustainable development have appeared: electric power packs, operating simulators for crane operator training, and sludge treatment units. □

#### INNOVACIÓN E HIDROFRESAS

JEAN-FRANÇOIS MOSSER, SOLETANCHE BACHY - STÉPHANE MONLEAU, SOLETANCHE BACHY - FRANÇOISE ROUMEGOUX, SOLETANCHE BACHY

Desde su invención en los años 1970 por Soletanche Bachy, la hidrofresa se ha convertido en la herramienta esencial para perforar pantallas de hormigón. Estos últimos años, los desarrollos se han acelerado para responder a las crecientes necesidades de los clientes y a proyectos cada vez más ambiciosos: zonas de implantación limitadas, mayores profundidades y grosos, así como tolerancias de verticalidad reducidas. De este modo, han surgido las hidrofresas compactas, urbanas o, recientemente, provistas de pinzas. Paralelamente, han aparecido algunas innovaciones que contribuyen al desarrollo sostenible: power packs eléctricos, simuladores para la formación de conductores de grúa, unidades de tratamiento de los lodos. □

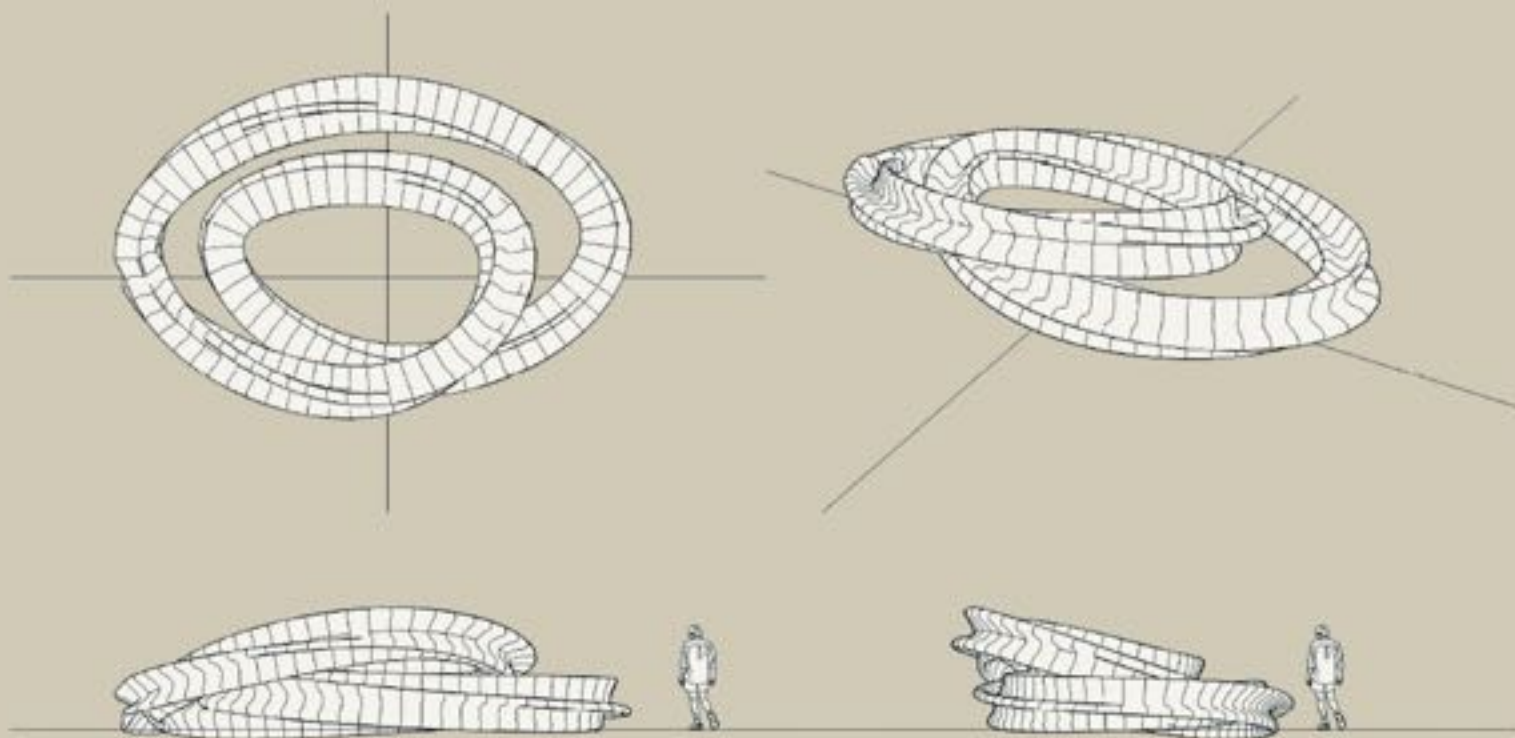


# QUELLE INGÉNIERIE POUR LES CHANTIERS DE DEMAIN ?

AUTEURS : AYMERIC PERRET DU CRAY, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI - AUDREY ZONCO, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI

SI L'ON EN CROIT L'EMBALLÉMENT ACTUEL AUTOUR DU SUJET, LES CHANTIERS DE CONSTRUCTION POURRAIENT RADICALEMENT CHANGER DANS UN AVENIR PROCHE. SUR SITE COMME DANS LES USINES DE PRÉFABRICATION, DE PLUS EN PLUS DE TÂCHES SERONT AUTOMATISÉES. MAIS LES ENTREPRISES DE CONSTRUCTION NE SERONT PAS LES SEULES TOUCHÉES PAR CES BOULEVERSEMENTS. LES BUREAUX D'INGÉNIERIE ET LES BUREAUX D'ÉTUDES DOIVENT AUSSI SE PRÉPARER À L'ÉVOLUTION DE LEUR MÉTIER.

## GÉOMÉTRIE INSPIRÉE DE LA FORME D'UN RUBAN DE MOEBIUS



1

© SETEC TPI

### CONTEXTE

La robotisation touche un grand nombre de secteurs d'activité et tend à s'intensifier. Elle évoque immédiatement l'industrie automobile, pionnière dans l'automatisation des tâches répétitives ainsi que les industries de pointe (électronique, pharmaceutique) dont les chaînes de production sont largement automatisées. Mais il

existe des domaines dans lesquels, il y a seulement quelques années, on ne s'attendait pas à voir des robots assister les hommes. Qui aurait imaginé, il y a 10 ans, se faire opérer par un robot semi-autonome ? Aux États-Unis, 80% des opérations de la prostate sont aujourd'hui assistées par le robot Da Vinci. Dans le domaine de la logistique, Kiva Systems a révolutionné les

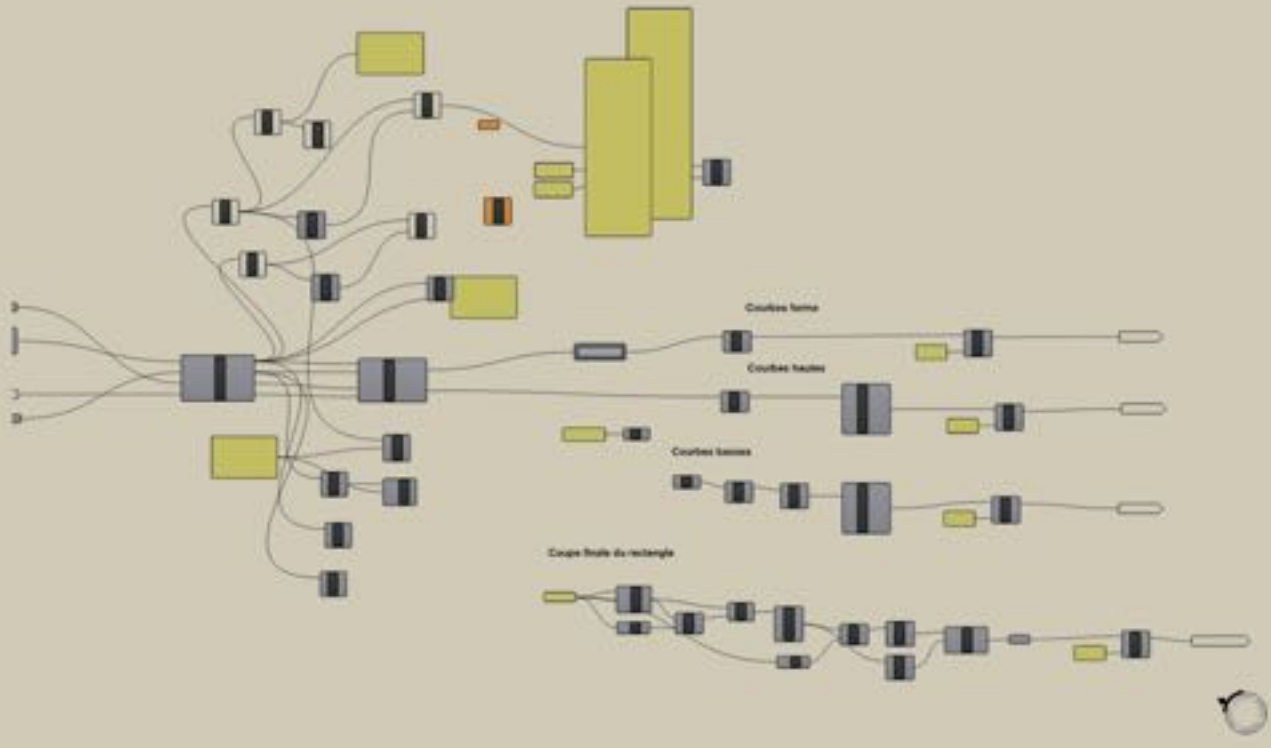
**1- Géométrie inspirée de la forme d'un ruban de Möbius.**

**1- Geometry inspired by the shape of a Möbius strip.**

entrepôts d'Amazon en éliminant les déplacements exténuants des préparateurs de commande : aujourd'hui ce ne sont plus les hommes mais les étagères qui se déplacent.

Certes le secteur de la construction est conservateur et les innovations y mettent du temps à percer. Il y a bien sûr des raisons à cela. Les chantiers, poussiéreux, humides, accidentés, sont

## MODÉLISATION PARAMÉTRIQUE SUR RHINO GRASSHOPPER



© SETEC TPI  
2

des environnements difficiles pour les machines.

D'autre part, chaque bâtiment est un prototype, ce qui complique l'industrialisation de sa construction. Mais la robotisation des chantiers est moins futuriste qu'il n'y paraît.

Elle s'inscrit d'abord dans la continuité d'expériences menées dans les années 80 au Japon. Elle est ensuite et surtout portée par les développements récents des moyens de calcul et de programmation ainsi que par l'apparition de capteurs (optiques, de mouvement, etc.) à bas coût.

### 2- Modélisation paramétrique sur Rhino Grasshopper.

### 3- Coupe de la gaine vers l'extérieur de la courbure.

### 2- Parametric modelling on Rhino Grasshopper.

### 3- Cross section of the shaft toward the outside of the curve.

### UN FOISONNEMENT D'INITIATIVES

Aujourd'hui, une profusion d'entreprises, de startups, de laboratoires mettent au point de nouvelles manières de construire. Leurs motivations sont multiples et les promesses séduisantes comme celles :

- De la réduction de la pénibilité de certaines tâches ;
- D'une meilleure qualité des ouvrages exécutés ;
- De gains de temps de réalisation ;
- D'une plus grande liberté formelle.

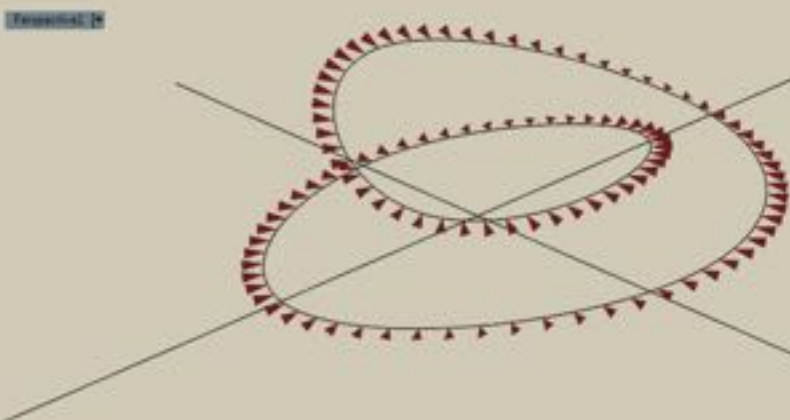
Les gains de productivité sont recherchés par les entrepreneurs. L'idée n'est

alors pas de construire différent mais différemment. À titre d'exemple, on peut citer le système développé par la société australienne Fastbrick robotics. Parfaitement adapté au marché australien du logement (composé de nombreuses maisons individuelles), il permet de poser 20 fois plus de briques à l'heure qu'un ouvrier qualifié et ainsi de réaliser la maçonnerie d'une maison en seulement deux jours.

Des flottes de drones pour la topographie et le suivi de chantier aux véhicules autonomes pour les terrassements en passant par la fabrication additive en béton, les applications de la robotique ne manquent pas. Certes, il est difficile de dire combien de temps il faudra à certaines de ces technologies pour être mûres. Mais des technologies de transition existent déjà. Pour n'en citer qu'une, Odico Formwork Robotics a par exemple industrialisé la production de coffrages à simple ou double courbure dans des blocs de mousse.

Aux antipodes des préoccupations de ces entrepreneurs innovants, des architectes et artistes s'intéressent aussi à la robotique. Ils y voient l'opportunité de créer des formes inédites, variées et paramétrées, impossibles à réaliser traditionnellement. Les robots leurs permettent aussi de revisiter des matériaux peu usités car de mise en œuvre trop onéreuse.

## COUPE DE LA GAINE VERS L'EXTÉRIEUR DE LA COURBURE



© SETEC TPI  
3



Le bois et la pierre prennent, grâce à leur imagination, une nouvelle jeunesse (les travaux du Block Research Group de l'ETH Zurich sont intéressants à cet égard).

Ainsi, depuis une dizaine d'années, une avant-garde d'architectes académiques explorent le champ des possibles qui s'offre à eux. Les travaux, notamment de Gramazio et Kohler de l'ETH Zurich, ont inspiré la profession. Et aujourd'hui les laboratoires dédiés à la robotique éclosent dans les écoles d'architecture un peu partout dans le monde. En témoignent les contributions grandissantes aux conférences internationales Fabricate et RobArch.

Il y a, certes, un effet de mode. Mais ces recherches sont particulièrement stimulantes en ce qu'elles ouvrent la porte à une nouvelle esthétique.

Après l'adoption massive d'outils de conception 3D, après la popularisation du *computational design*, les architectes s'intéressent à la fabrication numérique. Maintenant que les outils de conception numérique sont au point, ils se concentrent sur le maillon faible de la chaîne, celui qui les bride dans leur créativité. Au point de jouer un rôle moteur dans le développement de la robotique appliquée à la construction. Dans cette effervescence, les bureaux d'études vont, eux aussi, devoir s'adapter pour offrir de nouveaux services à leurs clients traditionnels que sont les architectes et les entreprises de construction.

#### EXPÉRIMENTATION

Afin de pratiquer ces nouvelles technologies et de nous confronter aux difficultés inhérentes à leur utilisation, nous avons choisi de construire la maquette d'une structure qui pourrait être réalisée à l'aide d'un bras industriel<sup>(1)</sup>. Le projet a été mené en partenariat avec le NUMA et le master Design by Data des Ponts et Chaussées. L'Architecte Julie Howard, volontaire pour nous accompagner dans cette exploration, nous a demandé de l'aider à concevoir un banc urbain à géométrie libre et continue, inspiré de la forme d'un ruban de Möbius (figure 1).

D'un point de vue structurel, les voussoirs préfabriqués sont liés par un câble de précontrainte central. Dans l'idée d'une structure finale en voussoirs coulés ou moulés, la section transversale est constante avec des parois minces et arrondies. Bien sûr dans le projet final, la section pourrait être variable pour créer des assises confortables. La section tourne sur elle-même le long



4 © SETEC TPI

de la fibre neutre de la génératrice, et crée ainsi la géométrie de Möbius. La surface de contour de chaque voussoir est donc gauche mais réglée et peut être découpée par un fil chaud droit. Le fil découpe également la gaine centrale du câble.

Une modélisation paramétrique sur Rhino Grasshopper est réalisée (figure 2). Elle permet d'orienter automatiquement la coupe de la gaine vers l'extérieur de la courbure, de façon à éviter la sortie du câble lors de la mise en tension (figure 3). Grâce à cette modélisation paramétrique, toute modification de la courbe génératrice, des sections transversales, du nombre de

**4- Découpe au fil fixe du bloc de polystyrène, solidarisé à un bras industriel ABB, mobile.**

**5- Rotation autour de l'axe vertical du bloc.**

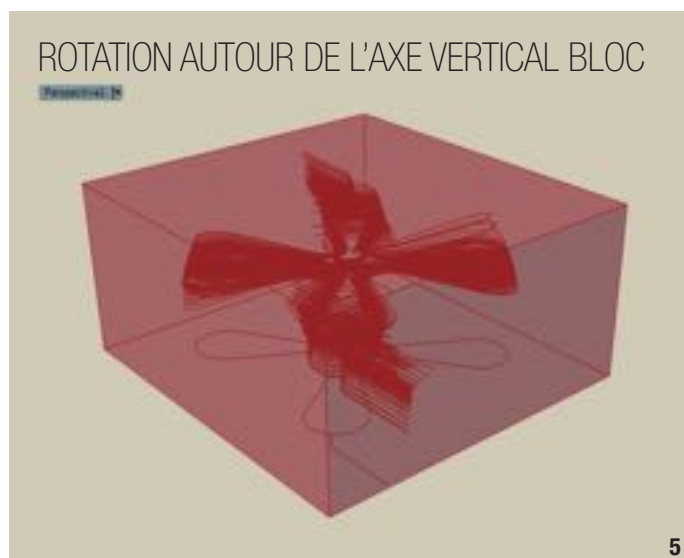
**4- Fixed-wire cutting out of the block of polystyrene, integral with a mobile ABB industrial arm.**

**5- Rotation around the vertical axis of the block.**

voussoirs, ou du mouvement de torsion, entraîne une mise à jour automatique de la géométrie de chaque voussoir. Cela permet de corriger instantanément la géométrie en fonction des souhaits de l'architecte.

La maquette, à l'échelle 1/10 est faite de polystyrène découpé à l'aide d'un fil chaud tout comme le seraient les moules du prototype à l'échelle 1. Le fil chaud est fixe et le bloc de polystyrène, solidarisé à un bras industriel ABB, mobile (figure 4).

La hauteur du fil chaud et la position du bras sont adaptés pour laisser le plus de place possible à la trajectoire du bras et limiter les collisions. Première leçon : les bras industriels sont des brutes aveugles. Ignorants de leur environnement, il faut les calibrer pour faire coïncider le repère dans lequel ils se déplacent avec celui de leur environnement réel. Puis il faut simuler numériquement toutes les trajectoires que l'on souhaite leur faire faire afin de vérifier que celles-ci sont valides. C'est à dire qu'en tout instant les points de ces trajectoires sont atteignables par le bras et qu'il n'y pas de collision du bras ou de ses outils avec leur environnement. Dans notre cas, le bloc de polystyrène est placé, tel un outil, à l'extrémité du bras. Une pièce permettant de le fixer sur le robot est dessinée puis imprimée en 3D. Deuxième leçon : les bras industriels savent uniquement reproduire une trajectoire dans l'espace. Pour toute applications concrète un ou plusieurs



5

© SETEC TPI



© SETEC TPI  
6

outils (les mains du robot) doivent être conçues et fabriquées. Cela rend les bras industriels très polyvalents. Mais seuls, ils sont inutiles.

En parallèle, un script est rédigé pour générer les trajectoires qui seront suivies par le bras lors de la production des voussoirs. Chaque voussoir est d'abord déplacé depuis sa position théorique dans l'ouvrage vers une position horizontale dans le bloc de polystyrène. Les voussoirs subissent ensuite une rotation autour de l'axe vertical pour que leur dimension courte entre dans la largeur du bloc (figure 5). Les trajectoires sont alors programmées pour que deux voussoirs soient découpés par bloc. Troisième leçon : un peu de temps passé lors de la phase de programmation peut en faire gagner beaucoup en production. En l'occurrence, la découpe de plusieurs voussoirs par bloc de polystyrène, associée à un réglage fin

**6- Une pièce spécifique découpée au laser permet d'ancrer les deux extrémités du câble.**

**6- A specific part cut out by laser can anchor the two ends of the cable.**

des vitesses de déplacement du bras a permis de diviser par deux le temps de découpe. De même, pour faciliter l'assemblage et améliorer la résistance finale de l'ouvrage, des clefs auraient pu être programmées entre voussoirs moyennant... plus de temps passé à programmer les trajectoires.

Une fois les 110 voussoirs découpés et numérotés, ceux-ci sont assemblés puis mis en tension grâce à un sandow de 4 mm de diamètre. Une pièce spécifique découpée au laser permet d'ancrer les deux extrémités du câble (figure 6).

La réalisation de cette maquette a nécessité 4 jours de scripts, 2 jours de mise en place et calibrage du matériel, et 2 jours de fabrication.

#### QUEL AVENIR POUR LES BUREAUX D'ÉTUDES ?

Pour le robot, il est aussi facile et rapide de découper des voussoirs tous identiques que tous différents. Mais la complexité n'a pas totalement disparu. Elle s'est déplacée de l'étape de fabrication à celle de conception. La difficulté réside en effet dans l'établissement d'un script de commandes pour le robot, qui doit tout prévoir et

automatiser pour que la fabrication se déroule sans heurt.

À mesure que la fabrication de composants s'automatise, le travail d'interprétation, d'adaptation, de correction, de réflexion mené par l'artisan ou l'ouvrier durant l'exécution est transféré en études. Ce travail supplémentaire nécessitera des bureaux d'études qu'ils définissent leurs projets jusque dans les moindres détails. Les livrables évolueront également avec les méthodes de réalisation. Les plans papier, faits pour être lus par des hommes, resteront utiles pour nous représenter le projet. Mais les scripts de commandes des machines deviendront les pièces de référence. D'autre part, à l'instar de ce qui se passe dans d'autres industries, de nombreux robots génériques seront à l'avenir utilisés sur site comme en atelier de préfabrication. Ces systèmes devront être combinés, paramétrés, coordonnés pour qu'ils réalisent ensemble la tâche unique qui leur sera confiée avant d'être affectés à un chantier différent. Ce travail d'organisation de la production sera à recommencer pour chaque chantier : contrairement aux chaînes de production industrielle, les chantiers ne durent que quelques années et sont tous singuliers.

Le développement des méthodes robotiques d'un chantier nécessitera ainsi des compétences d'intégrateur industriel. Éventuellement, pour confectionner des outils ad hoc, il faudra s'adjoindre celles de prototypage en robotique. Les bureaux d'études, déjà très impliqués dans les maquettes numériques et le BIM, ont un rôle clef à jouer en concevant, pour les entreprises, des process automatisés et adaptés aux contraintes de leurs chantiers. Pour cela, ils devront cultiver la pluridisciplinarité en faisant appel à des roboticiens, des intégrateurs industriels et des informaticiens. □

1 - Voir la vidéo sur <https://www.youtube.com/watch?v=EyMiQAjUaeM>

#### ABSTRACT

### ENGINEERING INNOVATION FOR PROJECTS OF THE FUTURE

AYMERIC PERRET DU CRAY, SETEC TPI - AUDREY ZONCO, SETEC TPI

**Setec Group's innovation design contest launched in September 2016 revealed ten very well designed projects, backed by motivated teams. Among the projects selected, the work by Audrey Zonco and Aymeric Perret du Cray on robotic applications for construction reviewed progress in this sector and initiated thinking about the role of engineering offices and specialists alongside construction firms, in defining the model, programming, industrial integration of the process used, and execution follow-up. □**

### ¿QUÉ INGENIERÍA PARA LAS OBRAS DEL FUTURO?

AYMERIC PERRET DU CRAY, SETEC TPI - AUDREY ZONCO, SETEC TPI

**Iniciado en septiembre de 2016, el concurso de innovación del grupo Setec ha revelado diez proyectos de excelente factura, respaldados por unos equipos motivados. Entre los proyectos elegidos, los trabajos de Audrey Zonco y Aymeric Perret du Cray sobre robótica al servicio de la construcción plantean los avances en este ámbito y abren una reflexión acerca del papel de los gabinetes de estudio e ingeniería en relación con las empresas de construcción: definición del modelo, programación, integración industrial del procedimiento utilizado y seguimiento de la realización. □**





© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE

# LE VIADUC SOLAIRE

AUTEUR : SERGE MONTENS, SYSTRA

**IL SEMBLE INTÉRESSANT D'UTILISER LES VIADUCS DE MÉTRO AÉRIEN POUR PLACER DES PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES, CEUX-CI NE DEMANDANT AUCUNE EMPRISE AU SOL SUPPLÉMENTAIRE PAR RAPPORT À CELLE DU VIADUC. L'ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR CES PANNEAUX SOLAIRES POURRAIT, SOIT ÊTRE VENDUE, SOIT ÊTRE UTILISÉE POUR LE SYSTÈME DE TRANSPORT LUI-MÊME. SI L'ON ÉQUIPE LA TOTALITÉ DU VIADUC EN PANNEAUX SOLAIRES, LA QUANTITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ PRODUITE EST DU MÊME ORDRE DE GRANDEUR QUE L'ÉLECTRICITÉ NÉCESSAIRE POUR LE FONCTIONNEMENT DES STATIONS.**

## CONCEPT

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses villes dans le monde ont fait construire des viaducs aériens de grande longueur. Il paraît pertinent d'utiliser ces structures pour placer des panneaux solaires photovoltaïques, ceux-ci ne demandant aucune emprise au sol supplémentaire par rapport à celle du viaduc.

Les panneaux seraient supportés par une ossature métallique assez légère, elle-même ancrée sur le tablier du viaduc.

Cette innovation ne comporte pas de saut technologique. Tous les éléments dont elle est constituée sont connus et éprouvés. C'est uniquement leur

association qui est nouvelle. L'électricité produite par ces panneaux solaires pourrait, soit être vendue, soit être utilisée pour le système de transport lui-même. De plus, le côté visible des panneaux permettrait de mettre en valeur l'image « développement durable » de la société propriétaire du métro. L'idée d'associer des panneaux solaires à des infrastructures de transport est dans l'air du temps.

Systra a ainsi réalisé une étude de faisabilité d'un viaduc solaire pour métro, en considérant des situations géographiques différentes, étant donnée la variabilité géographique de la production d'énergie photovoltaïque : Paris, Delhi, Dubaï, Panama.

**1- Exemple n°1 de disposition pour un tronçon est-ouest - vue côté sud.**

**1- Example 1 of the layout for an East-West section - southern end view.**

Le viaduc étudié comporte un tablier ayant une section transversale en forme de U supportant les deux voies. Ce type de viaduc, breveté par Systra, a déjà été construit dans de nombreuses villes dans le monde.

## CONFIGURATION GÉNÉRALE

Les panneaux solaires envisagés sont des panneaux standard constitués de silicium poly-cristallin. Ils ont une taille de 1 m x 1,65 m, une puissance maximale de 260 Wc (Watt crête), et un rendement de 15%.

L'orientation des panneaux constitue un paramètre primordial pour l'optimisation de l'énergie produite par une installation photovoltaïque. Cette orientation est fixée par deux paramètres : l'azimut (direction de la projection horizontale de la normale aux panneaux par rapport à la direction du nord), et l'inclinaison (angle entre le plan des panneaux et le plan horizontal). Du fait de la corrélation entre la production



2

© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE

électrique et l'azimut d'un panneau, la direction géographique de la ligne de métro (son azimut) est un paramètre fondamental.

Pour un tronçon de ligne de direction est-ouest, les panneaux devant être orientés vers le sud (tout au moins dans l'hémisphère Nord), il est clair que les panneaux doivent être dans un plan incliné continu, le bord inférieur de ce plan suivant le bord du viaduc du côté Sud. Cela permet de disposer des panneaux sur toute la longueur du tronçon de viaduc (figures 1, 2 et 3). Une passerelle de maintenance de 700 mm de largeur est disposée le long des panneaux, du côté bas.

**2- Exemple n°1 de disposition pour un tronçon Est-Ouest - vue côté Nord.**

**3- Exemple n°2 de disposition pour un tronçon Est-Ouest.**

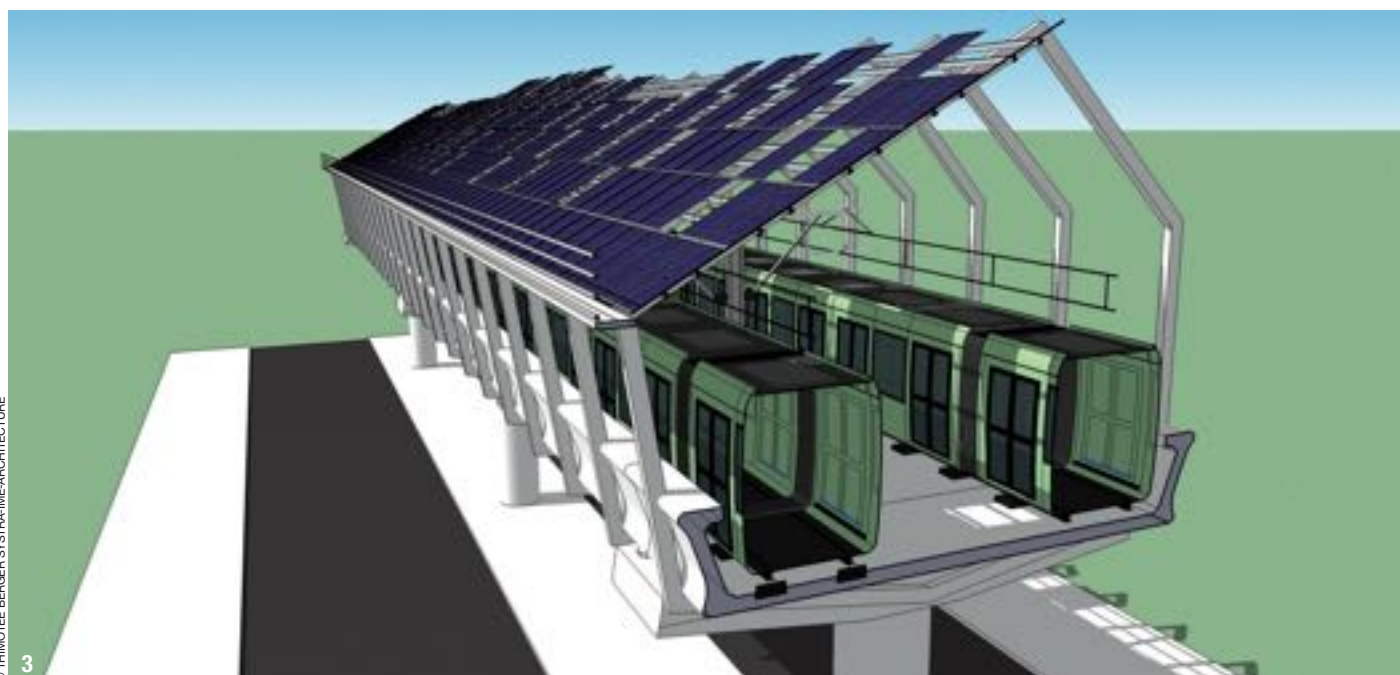
**2- Example 1 of the layout for an East-West section - northern end view.**

**3- Example 2 of the layout for an East-West section.**

On y accède par les stations, et éventuellement par des échelles à crinoline intermédiaires, dans le cas où la partie de viaduc située entre deux stations n'est pas équipée en totalité de panneaux solaires.

Pour un tronçon de ligne de direction nord-sud, on pourrait penser a priori qu'il est intéressant de placer les panneaux sous formes de sheds successifs, les panneaux étant donc orientés vers le sud, avec un espace entre eux de façon à minimiser l'ombre portée d'un panneau sur le panneau suivant (figure 4). Mais de ce fait, on ne peut pas placer de panneaux sur toute la longueur du viaduc. Nous avons étudié

cette disposition en shed. Elle est plus difficile à traiter architecturalement. Une autre disposition consiste à placer les panneaux comme dans le cas d'un tronçon Est-Ouest, mais avec une inclinaison beaucoup plus faible, soit avec une pente unique, soit avec un profil en toit, la pente étant réduite ( $2^\circ$  à  $5^\circ$ ). L'orientation des panneaux n'est pas optimale, mais on peut en placer sur toute la longueur du viaduc (figure 5). On s'aperçoit finalement qu'il est plus intéressant, en termes d'irradiation totale, de placer les panneaux ainsi. De plus, cette disposition conduit à une baisse de production à midi, et à une plus forte production le matin et le soir. ▷



3

© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE





4

© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE

Ceci est favorable si l'on souhaite utiliser l'énergie produite pour le métro, car la consommation d'énergie électrique est plus forte aux heures de pointe du matin et du soir.

Des rendus architecturaux ont été réalisés, pour différentes localisations (figures 6 et 7).

### ÉTUDE STRUCTURELLE

La charpente métallique nécessaire pour le supportage des panneaux a été dimensionnée. Il s'agit de portiques transversaux assez rapprochés, constitués de profils creux de section rectangulaire (figure 8). Les calculs produits ont montré que les critères liés aux

déformations de la charpente sont les plus pénalisants dans le dimensionnement. Le coût de construction correspondant a été déterminé.

On a déterminé également quel serait le surcoût de construction du viaduc lui-même (tablier, piles et fondations) par rapport à un viaduc non équipé de panneaux. Les principales conséquences de la mise en place des panneaux sont l'augmentation des charges verticales, et surtout l'augmentation de la prise au vent. Le surcoût représente une proportion de l'ordre de 1,1 à 6,9% suivant l'azimut du tronçon de ligne et sa localisation géographique (et donc la vitesse du vent dans le site).

**4- Disposition en shed pour un tronçon Nord-Sud.**

**5- Disposition transversale retenue pour un tronçon Nord-Sud.**

**4- Shed layout for a North-South section.**

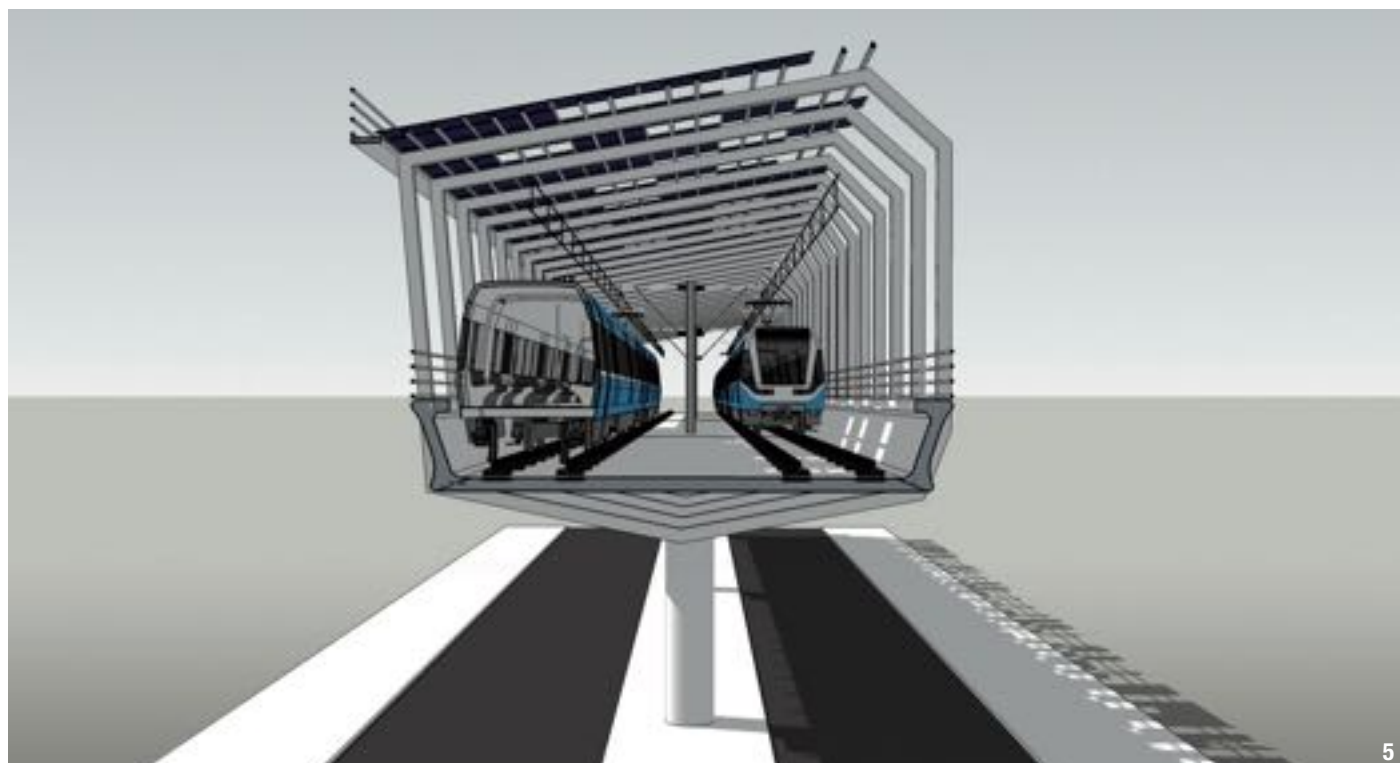
**5- Transverse layout selected for a North-South section.**

### ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE ET ÉCONOMIQUE PRODUCTION ÉLECTRIQUE DES PANNEAUX SOLAIRES

La production électrique (appelée aussi « productible »), en kWh/kWc/an a été déterminée pour les quatre localisations choisies. Les résultats sont indiqués sur le tableau A.

On peut noter aussi que le productible maximal varie assez peu en fonction de l'inclinaison, autour de l'inclinaison optimale.

On utilise ensuite le ratio de 160 Wc/m<sup>2</sup> pour en déduire la production électrique par m<sup>2</sup> de panneau, puis par mètre de viaduc.



5

© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE





© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE

Les valeurs suivantes supposent une largeur de tablier de 10 m et tiennent compte de surfaces de panneaux différentes pour les quatre localisations, du fait des inclinaisons différentes. Il a été considéré ici que la largeur totale du tablier était équipée de panneaux. L'énergie produite en un an, ramenée à 1 mètre de viaduc, a été

**6- Rendu architectural pour Dubaï.**  
**7- Rendu architectural pour Delhi.**

**6- Architectural depiction for Dubai.**  
**7- Architectural depiction for Delhi.**

calculée avec deux hypothèses différentes :

- Équipement de toute la ligne (en supposant que l'ensemble du tracé de la ligne a des azimuts équi-distribués) ;
- Équipement des tronçons de direction est-ouest (ou d'azimut proche) uniquement.

**COÛT DE L'ÉNERGIE PRODUITE**

Le coût de l'énergie produite a été déterminé en divisant le coût total par la production électrique totale pendant la durée de vie des panneaux (considérée égale à 25 ans ou 30 ans, avec une perte d'efficacité des panneaux solaires de 0,3% par an). Le coût total est la somme de :

- Coût de fourniture et d'installation des panneaux (câblage et onduleurs inclus) ;
- Coût de maintenance des panneaux, et de leur recyclage en fin de vie ;
- Coût de construction de la charpente ;
- Coût de maintenance de la charpente ;
- Surcoût du viaduc.

Le coût total de construction du viaduc solaire est de 15 à 54% plus élevé que celui du viaduc non équipé de panneaux solaires, suivant la localisation géographique. Il apparaît que pour toutes les localisations géographiques étudiées ci-dessus, le prix de revient de l'énergie produite est toujours inférieur au prix public de l'électricité. Le bilan économique sera d'autant plus favorable que :

- L'ensoleillement est important en terme de productible (et non au sens courant) ;
- Le vent est faible ;
- Le prix public local de l'électricité est élevé.



© THIMOTÉE BERGER SYSTRA-IME-ARCHITECTURE



## UTILISATION DE L'ÉNERGIE PRODUITE

L'énergie produite qui n'est pas auto-consommée immédiatement pourrait être soit revendue à l'équivalent local d'EDF, soit stockée dans des batteries placées dans les stations, et réutilisée pour alimenter les stations à un autre moment de la journée.

Le calcul économique est à faire en fonction du prix des batteries et des prix de vente et d'achat à l'équivalent local d'EDF.

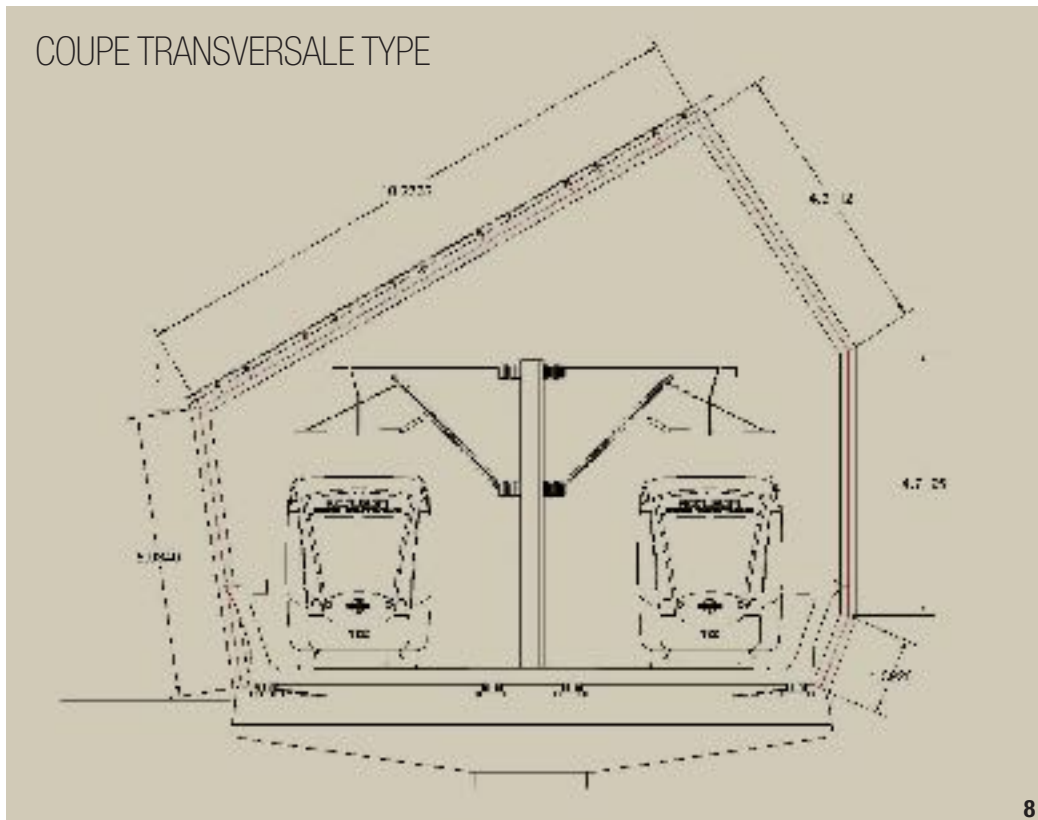
La puissance installée d'une station de métro aérienne est de l'ordre de 1250 kVA à 2 000 kVA (suivant la taille de la station et l'intensité du chauffage et de la climatisation).

La longueur de viaduc qu'il faut équiper de panneaux solaires pour produire une quantité d'électricité égale à celle consommée par une station a été évaluée pour ces deux valeurs de puissance et pour les quatre localisations étudiées.

Comme hypothèses, on a supposé une durée d'ouverture de la station de 20 heures par jour avec un coefficient de foisonnement de 0,6.

On en déduit la consommation annuelle d'une station. On la divise ensuite par la production annuelle par mètre de viaduc.

On trouve alors que la longueur de viaduc à équiper pour alimenter une sta-



tion est du même ordre que la distance moyenne entre stations, mais plutôt un peu supérieure. Les panneaux solaires pourraient ainsi permettre de couvrir 50 à 100 % des besoins des stations.

8- Coupe transversale type.

8- Typical cross section.

## CONCLUSION

L'intérêt technique et économique d'équiper des viaducs de métro de panneaux solaires photovoltaïques est démontré.

Le bilan économique a été réalisé dans le cas de quatre villes. On trouve que pour toutes les localisations étudiées le prix de revient de l'énergie produite est toujours inférieur au prix public de l'électricité.

Si l'on équipe la totalité du viaduc en panneaux solaires, la quantité d'électricité produite est du même ordre de grandeur que l'électricité nécessaire pour le fonctionnement des stations (entre 50 et 100 % suivant la distance entre stations et la consommation des stations). □

TABLEAU A : RÉSULTATS PRODUCTION ÉLECTRIQUE DES PANNEAUX SOLAIRES

Ville	Paris	Delhi	Dubaï	Panama
Productible (kWh/kWc/an)	1204	1819	1731	1336
Inclinaison optimale	35°	33°	25°	10°
Équipement de toute la ligne (azimuts équi-distribués) (kWh/ml/an)	2013	3020	2828	2145
Équipement des tronçons de direction est-ouest uniquement (kWh/ml/an)	2351	3470	3056	2171

## ABSTRACT

### THE SOLAR VIADUCT

SERGE MONTENS, SYSTRA

It seems interesting to use above-ground metro viaducts for installing photovoltaic solar panels, which require no extra land space in addition to that occupied by the viaduct. This innovation involves no technological leap. The electricity produced by these solar panels could either be sold or used for the transport system itself. Moreover, the visible side of the panels could enhance the "sustainable development" image of the company owning the metro. Systra accordingly performed a feasibility study of a solar viaduct for a metro system. The viaduct designed has a deck of U-shaped cross section carrying the two tracks. □

### EL VIADUCTO SOLAR

SERGE MONTENS, SYSTRA

Parece interesante utilizar los viaductos de metro aéreo para instalar paneles solares fotovoltaicos, que no precisan ninguna superficie de suelo adicional más allá de la del viaducto. Esta innovación no supone un salto tecnológico. La electricidad producida por los paneles solares podría venderse o ser utilizada por el propio sistema de transporte. Además, el lado visible de los paneles permitiría destacar la imagen de "sostenibilidad" de la empresa propietaria del metro. De este modo, Systra ha elaborado un estudio de viabilidad de un viaducto solar para metro. El viaducto estudiado consta de un tablero con una sección transversal en forma de U que soporta dos carriles. □

# Ductal® Projeté, l'innovation maîtrisée au service des maîtres d'ouvrages pour renforcer les buses métalliques

Réduction du temps d'intervention



Préservation des dimensions de circulation



Conservation du gabarit hydraulique et des seuils

Ductal® Projeté par Freyssinet : le BFUP se projette et offre la solution la plus fiable et robuste de renforcement de buses métalliques.



Des chantiers plus rapides



Des infrastructures sécurisées



La durabilité exceptionnelle du BFUP



Une continuité écologique préservée

Une innovation développée en partenariat avec Freyssinet, l'expert mondial du béton projeté, accompagné par le CETU (Centre d'Études des Tunnels) et l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux). Cette solution a été sélectionnée par le Comité Innovation Route et Rues IDRRIM (Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité).

PLUS D'INFORMATIONS SUR DUCTAL.COM

 FREYSSINET

*Ductal*

 A technology of  
LafargeHolcim

ductal@lafargeholcim.com





**PRO BTP,  
LE MEILLEUR DE LA  
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ

PRÉVOYANCE

RETRAITE

ÉPARGNE

ASSURANCES

ACTION SOCIALE

VACANCES

 **PRO BTP**  
GROUPE





1

© SOLETANCHE BACHY

# LE DIGITAL DANS LES FONDATIONS

AUTEURS : ALEXANDRE SCARWELL, RESPONSABLE INGÉNIERIE LOGICIELS ET DONNÉES, SOLETANCHE BACHY - JEAN-FRANÇOIS MOSSER, DIRECTEUR RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT, SOLETANCHE BACHY

**SOLETANCHE BACHY EST UN PIONNIER DANS L'INTRODUCTION DE L'INFORMATIQUE TECHNIQUE APPLIQUÉE AUX PROCÉDÉS DE TRAVAUX GÉOTECHNIQUES. AUJOURD'HUI, LE DIGITAL EST UTILISÉ AVEC POUR OBJECTIFS D'ACCÉLÉRER, DE VISUALISER, DE RATIONALISER, DE FIABILISER ET D'ARCHIVER LES PROCESSUS D'ÉTUDE, DE DESIGN ET DE PRODUCTION.**

## SOLETANCHE BACHY À LA POINTE DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

Les moyens électroniques et en logiciels n'ayant pas cessé de croître d'année en année, la complexité des services rendus par les fonctions informatiques aux utilisateurs en bureau d'études, en R&D et sur chantier a considérablement augmenté. Ce phénomène offre ainsi toujours davantage de temps aux utilisateurs pour se concentrer sur la création d'autres tâches ou métiers à nouvelles valeurs

ajoutées. Selon ce principe, le curseur se voit donc toujours déplacé dans le sens de l'amélioration du service rendu et de la productivité pour les chantiers. Soletanche Bachy s'inscrit parfaitement dans cette démarche en pensant et en réalisant ses propres solutions digitales adaptées à ses métiers et à ses procédés. Dans la suite de l'article sont mis en avant trois types de solutions pouvant, soit fonctionner en écosystème et donc être complémentaires, soit fonctionner de manière indépendante selon le contexte et la taille du chantier.

### 1- Chantier du Vert-de-Maisons.

#### 1- Le-Vert-de-Maisons project.

### TRAVAUX D'INJECTION

Les chantiers d'injection peuvent être de nature et de taille très variables et suivent, en partie ou en totalité, le processus design, préparation, exécution, reporting. Pour assister cette séquence

de phases, Soletanche Bachy a développé une suite logicielle nommée GrouIT permettant de couvrir chaque étape :

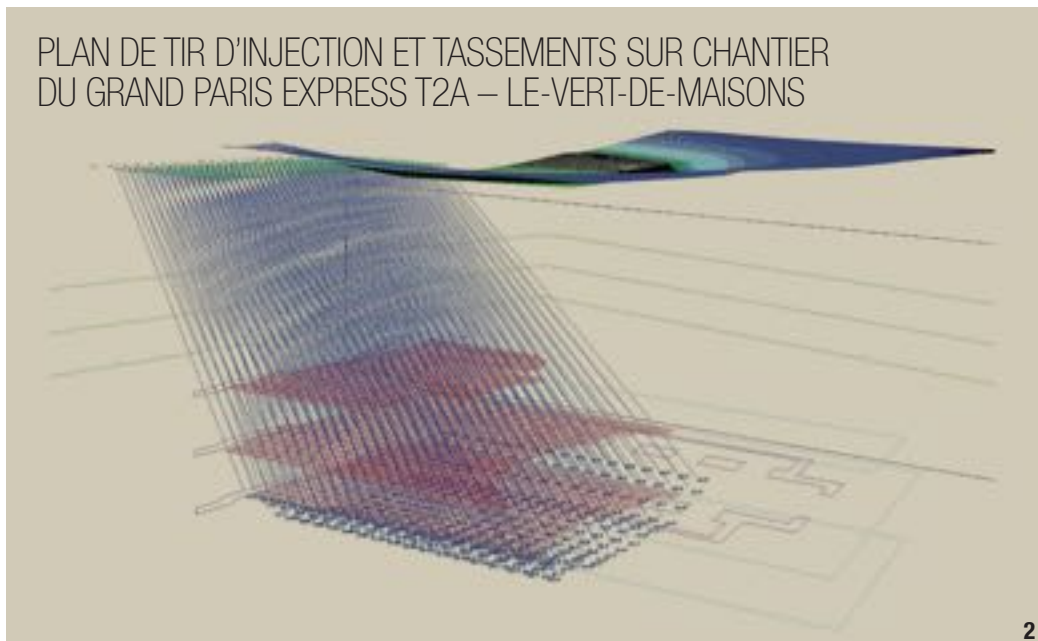
→ **Supplément au design** : sur la base des plans Autocad ou Revit faits en bureau d'études et qui donnent les implantations de la plateforme d'injection, des forages et les zones à injecter, les forages sont modélisés en calques additionnels 3D en respectant les instructions définies par les études (position, diamètre, inclinaison, orientation, ▷



longueur, etc.). Ceci permet de représenter des objets 3D propres au métier de l'injection dans le plan d'origine, chacun étant d'un type et ayant des propriétés, ce qui permet dans la suite de propager la terminologie et d'utiliser un langage homogène.

- **Préparation** : cette étape structure et organise un chantier d'injection en découpant, en identifiant et en caractérisant les opérations à venir tout en gardant un lien avec les objets 3D modélisés dans l'étape précédente. De ceci découlent les instructions d'injections à exécuter en fonction de la zone du chantier et du forage ; par extension cela peut être utilisé pour planifier les opérations à mener. Tout ce travail de préparation est regroupé au sein d'un Projet-Chantier GroutIT et enregistré en base de données, pour être mis à jour avec les informations *as built* de la production en quasi temps réel, et « requêtable » par les fonctions de visualisation et de reporting. Beaucoup d'informations sont enregistrées comme les compositions de matières injectées, les volumes, les débits, les numéros de forage et de manchettes, etc.
- **Exécution** : encadrées par une gestion de poste opérateur, les

## PLAN DE TIR D'INJECTION ET TASSEMENTS SUR CHANTIER DU GRAND PARIS EXPRESS T2A – LE-VERT-DE-MAISONS



2

© SOLETANCHE BACHY

instructions définies dans l'étape précédente sont ensuite exécutées, les pompes étant pilotées par une partie logicielle directement basée sur l'information de préparation en amont de la chaîne. Plusieurs points d'injection peuvent être pilotés simultanément. L'opération d'injection est visuellement monitorée en temps réel par suivi et enregistrement des mesures de pression et

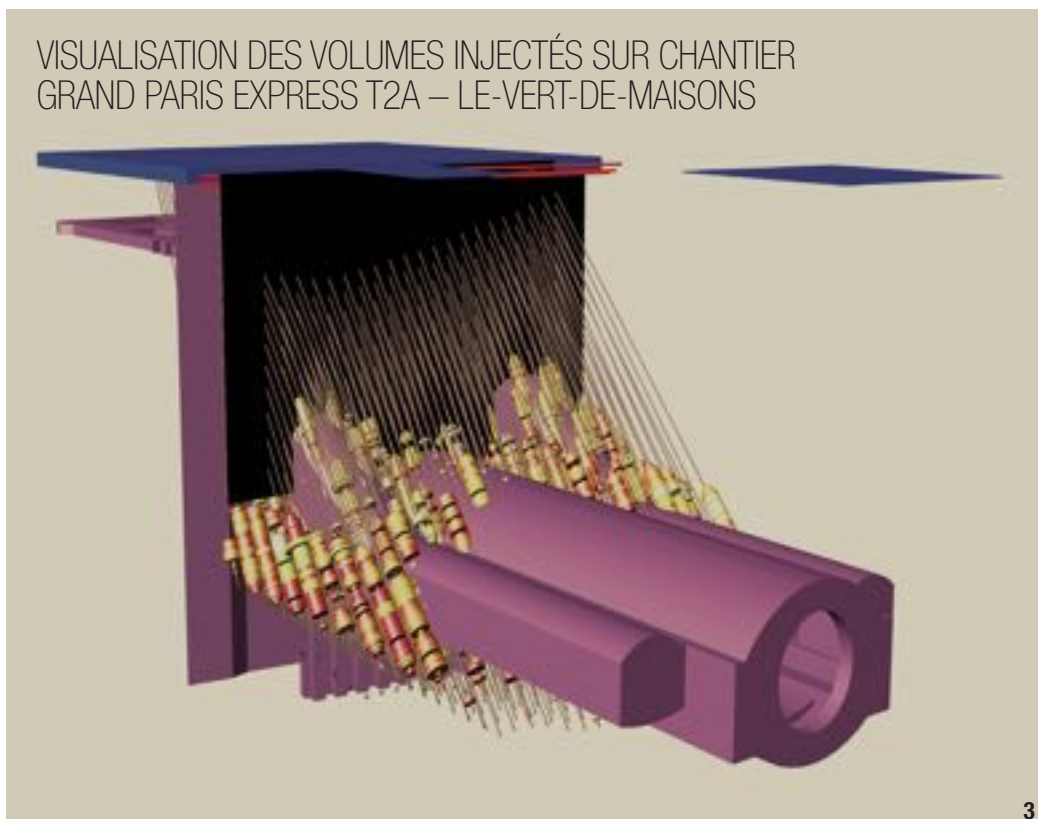
débit selon des consignes imposées, respectées par le logiciel.

- **Reporting** : des rapports d'injection sont produits sur la base des données enregistrées. Ils peuvent être synthétiques tabulaires, ou sous forme de courbes, ou 3D.

Le système peut concerner tous les types d'injection : injection de pénétration, injection de rocher, injection de compensation, méthode GIN, injection

de micropieux, pieux et barrettes. GroutIT a récemment été utilisé sur le chantier du Vert-de-Maisons du Grand Paris Express (figures 1, 2 et 3). Les derniers développements sur cette chaîne GroutIT ont été de l'adapter aux travaux d'injection aux États-Unis et pour la rénovation de barrages, puis de renouveler les fonctions assistant les travaux d'injection de compensation. GroutIT US/Dam (figure 4) :

## VISUALISATION DES VOLUMES INJECTÉS SUR CHANTIER GRAND PARIS EXPRESS T2A – LE-VERT-DE-MAISONS



3

© SOLETANCHE BACHY

**2- Plan de tir d'injection et tassements sur chantier du Grand Paris Express T2A – Le-Vert-de-Maisons.**

**3- Visualisation des volumes injectés sur chantier Grand Paris Express T2A – Le-Vert-de-Maisons.**

**2- Grout hole layout and subsidence on the Grand Paris Express T2A project – Le-Vert-de-Maisons.**

**3- Visualization of grouting volumes on the Grand Paris Express T2A project – Le-Vert-de-Maisons.**



© SOLETANCHE BACHY  
4a



4b

→ Gestion d'informations spécifiques à l'injection aux États-Unis (unités, calcul de perte de charge, paramètres de composition des fluides injectés, tests à l'eau).

→ Flexibilité de création d'instructions à la volée sans pour autant qu'elles aient été préparées en amont,

l'enregistrement des opérations se faisant néanmoins en base de données.

GroutIT Compensation :

→ Facilitation et fiabilité de création des programmes d'injection par duplication de programmes ou par critères de manchettes.

**4- Chantier de Boone Dam, Tennessee, États-Unis.**

**5- Injection sur chantier CrossRail, Londres.**

**6- Injection 3D CrossRail, Londres.**

**4- Boone Dam project, Tennessee, United States.**

**5- Jet grouting on the CrossRail project, London.**

**6- 3D grouting for CrossRail, London.**

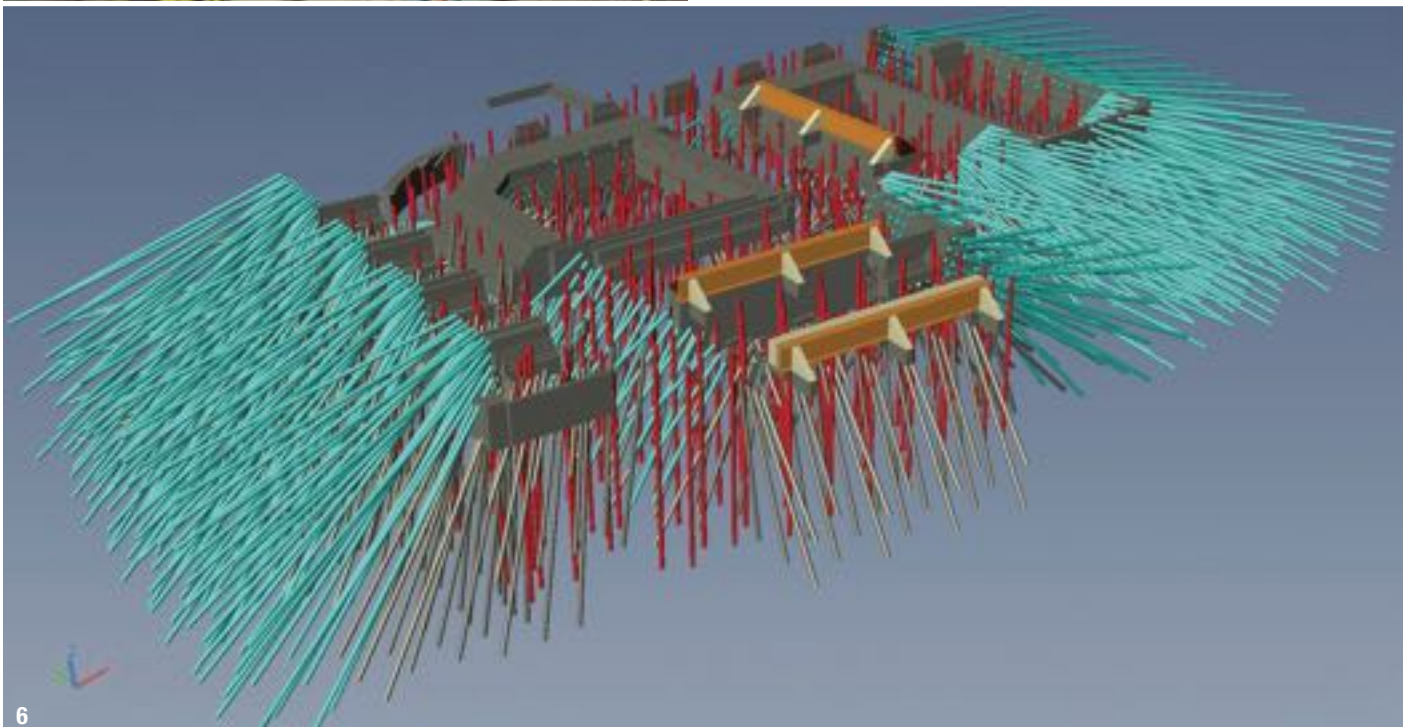
De plus, l'expérience utilisateur étant améliorée (intégration des fonctions plus facilement accessibles dans une nouvelle interface Homme/Machine), l'efficacité et la productivité sont accrues, en accélérant les tâches journalières qui prennent du temps.

→ Amélioration de la modélisation des tunnels, des anneaux et des zones d'exclusion pouvant avoir des sections complexes. Ceci accroît la précision des calculs des volumes excavés et donc des tassements et finalement des volumes à injecter pour compenser.

→ Phasage Quotidien/Planification : en fonction de la phase de compensation sont activés les anneaux en front de taille, et les zones d'exclusion. ▷



© SOLETANCHE BACHY  
5



© SOLETANCHE BACHY  
6





→ Amélioration des visualisations des cartes de tassements et des rapports en 2D/3D.  
 → Visualisation *replay* en séquence de plusieurs programmes d'injection : avancement du tunnelier, progression du tunnel, évolution des tassements, zones d'exclusion actives, manchettes sélectionnées, manchettes exclues.  
 GroutIT a été utilisé sur le chantier de compensation de CrossRail à Londres (figures 5 et 6).

### L'ASSISTANCE AU FORAGE PAR SUPERVISION

Les supervisions Soletanche Bachy sont des logiciels embarqués dans les machines de forage telles que les Hydrofraises (figure 7), les bennes hydrauliques KS, les petites foreuses. Ils permettent de faire l'acquisition en temps réel des données capteurs et des actionneurs afin de visualiser l'évolution du forage en cours, sa profondeur, les déviations et les vrillages d'outil. L'objectif consiste à contrôler en permanence le respect des tolérances

**7- Hydrofraise sur un chantier du Grand Paris Express.**

**8- Supervision en cabine de machine de forage.**

**9- Un des écrans de Supervision.**

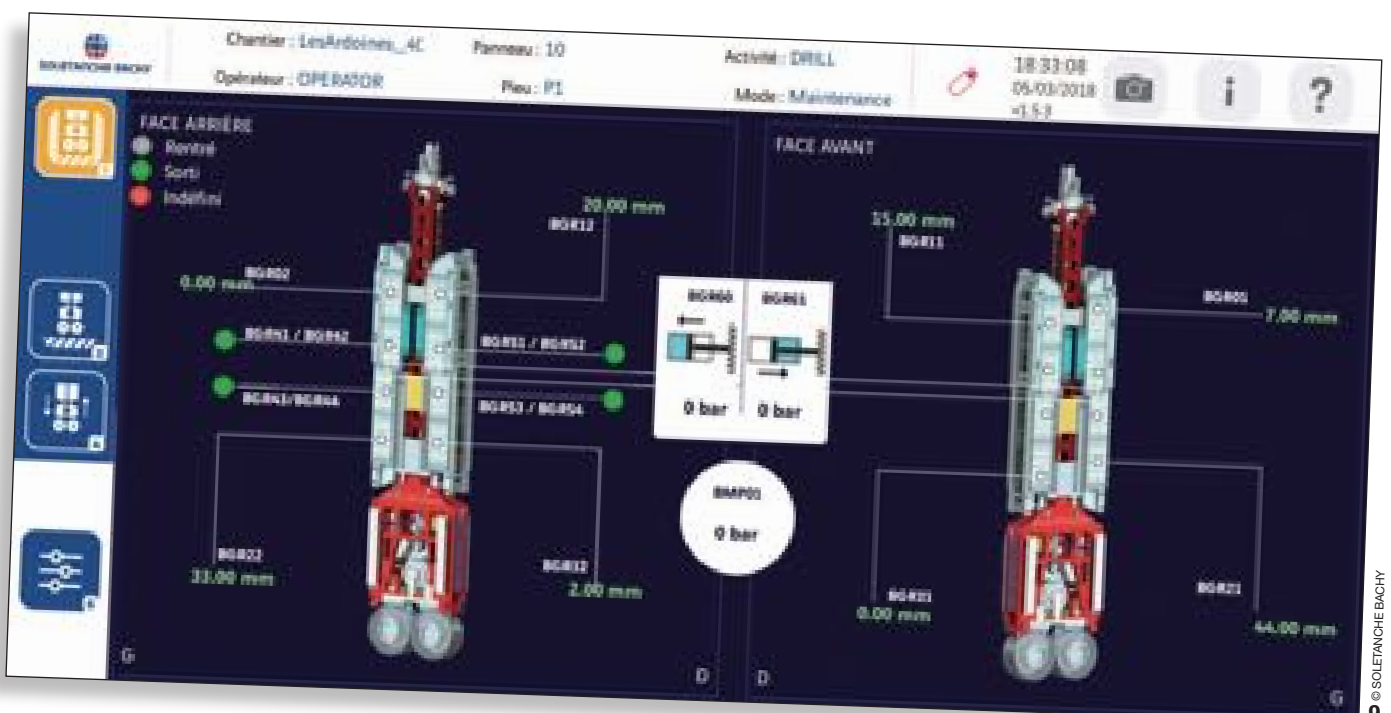
**7- Hydrofraise on a construction site for the Grand Paris Express.**

**8- Supervision in a drilling machine cab.**

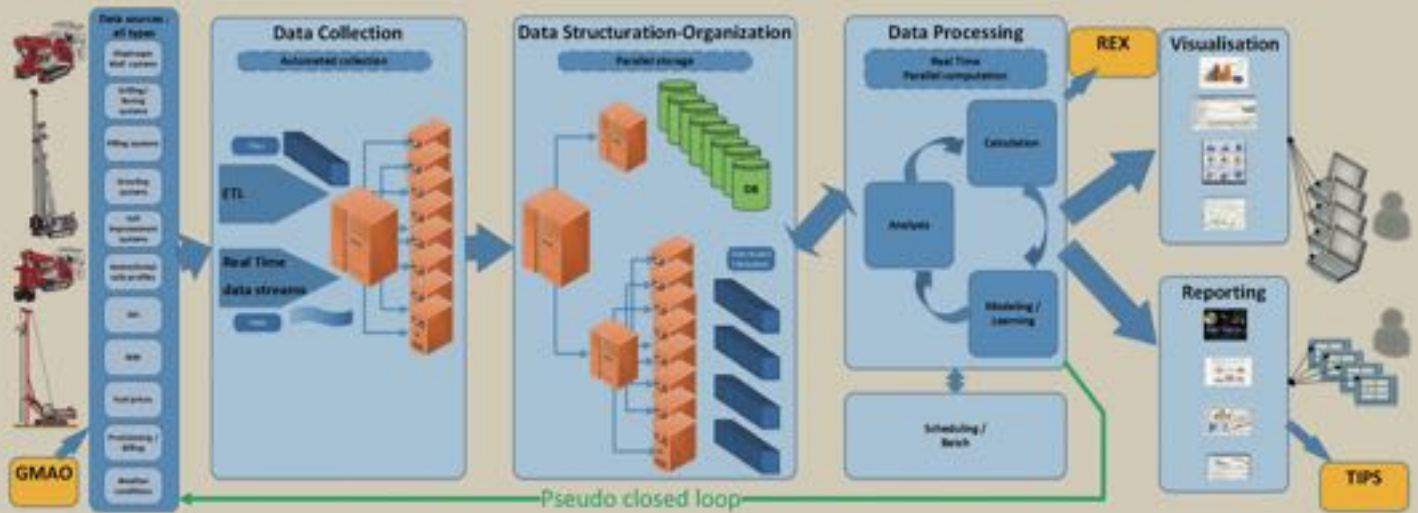
**9- One of the supervision screens.**

et, si besoin, à corriger les trajectoires (figure 8).

Tous les signaux capteurs (figure 9) sont enregistrés en fonction du temps et de la profondeur pour assurer la production de rapports de verticalité de parois et mener des analyses post-production. De surcroît, ces supervisions étant connectées depuis n'importe quel chantier dans le monde par liaison radio 4G à un DMS interne (Data Management System ou système de gestion de données en ligne), elles envoient leurs données en direct pour les sanctuariser, les partager, les consulter sur un



## ARCHITECTURE SIMPLIFIÉE DU SYSTÈME BIG DATA



10

© SOLETANCHE BACHY

site web sécurisé, puis les analyser en cas de problème ou pour améliorer les procédés et la productivité.

Soletanche Bachy étend les possibilités de ces supervisions communicantes en leur ajoutant des fonctionnalités de streaming de données diffusées en continu dans un périmètre contrôlé autour de la machine en opération et visualisables en temps réel seulement par des personnes autorisées possédant l'application cliente adéquate sécurisée. Ces données broadcastées peuvent également être visualisées de l'autre bout du monde, au bureau par exemple.

**10- Architecture simplifiée du système Big Data.**

**11- Portail de la plateforme Big Data.**

**10- Simplified architecture of the big data system.**

**11- Portal of the big data platform.**

### BIG DATA OU LES DONNÉES EN MASSE

Les métiers, techniques et procédés de fondations spéciales, produisent des masses considérables de données hétérogènes, qui constituent une mine colossale d'informations brutes.

Soletanche Bachy a choisi de valoriser et de rendre utile dans son travail au quotidien cette masse de données.

Ceci projette les fondations spéciales dans le monde des cinq « V » du Big Data : Volume de données, Vélocité des traitements, Variété des sources

et des formats de données, Véracité de l'information transportée par la donnée, Valeur ajoutée à créer avec cette donnée.

Le Big Data est une nouvelle grande étape marquante dans l'évolution de l'informatique, qui rend possibles, souvent de façon exploratoire, la centralisation et l'analyse de très grands volumes de données sur des délais courts.

L'architecture informatique que Soletanche Bachy a mise en place est représentée de manière simplifiée sur la figure 10.

En amont de la chaîne figurent quelques exemples de sources de données injectées dans des flux les acheminant jusqu'au système, le principe étant de ne jamais limiter l'entrée de toute nouvelle source.

Les applications et traitements opérés par cette plateforme Big Data sont pensés pour s'adresser à tous les profils utilisateurs du groupe avec leurs besoins tous différents, et avec des rôles différents. Bien entendu, les services offerts par ces applications sont accessibles n'importe où, n'importe quand, quel que soit le fuseau horaire (figure 11).

Les données récoltées sont aussi bien celles issues des travaux et procédés géotechniques que celles provenant des machines ou équipements, ce qui élargit d'autant plus le public concerné. Pour illustrer la description de cette activité sont mis en relief dans la suite de l'article deux cas d'utilisation apportant des valeurs ajoutées distinctes pour les profils utilisateurs différents. ▷



11 © SOLETANCHE BACHY





**HONG KONG 3205**

Le premier terrain d'application a été le chantier d'extension de l'aéroport international de Hong Kong pour la construction d'une piste d'atterrissage supplémentaire sur la mer. L'ampleur du chantier, représentant plus de soixante mille panneaux à produire en soil mixing, fait intervenir seize machines en deux postes par jour. Plus d'une centaine de panneaux sont produits chaque jour. Le système de données mis en place débute au niveau de chaque machine de forage embarquée sur une barge en mer (figure 12) ; en

effet, une supervision équipe chacune d'elles pour monitorer en temps réel le forage en cours, enregistrer puis envoyer par liaison sans fil ces données vers des serveurs informatiques de traitement, localisés sur la terre ferme. Dès qu'un panneau est foré et cimenté en mer, un jeu de données est immédiatement transmis automatiquement, et le système Big Data centralisé le contrôle entièrement pour le considérer comme conforme ou hors tolérances, avant de générer un rapport de contrôle, puis un rapport de production complexe ; ceci en moins de trois

**12- Machine de geomix sur barge, Hong Kong 3205.**

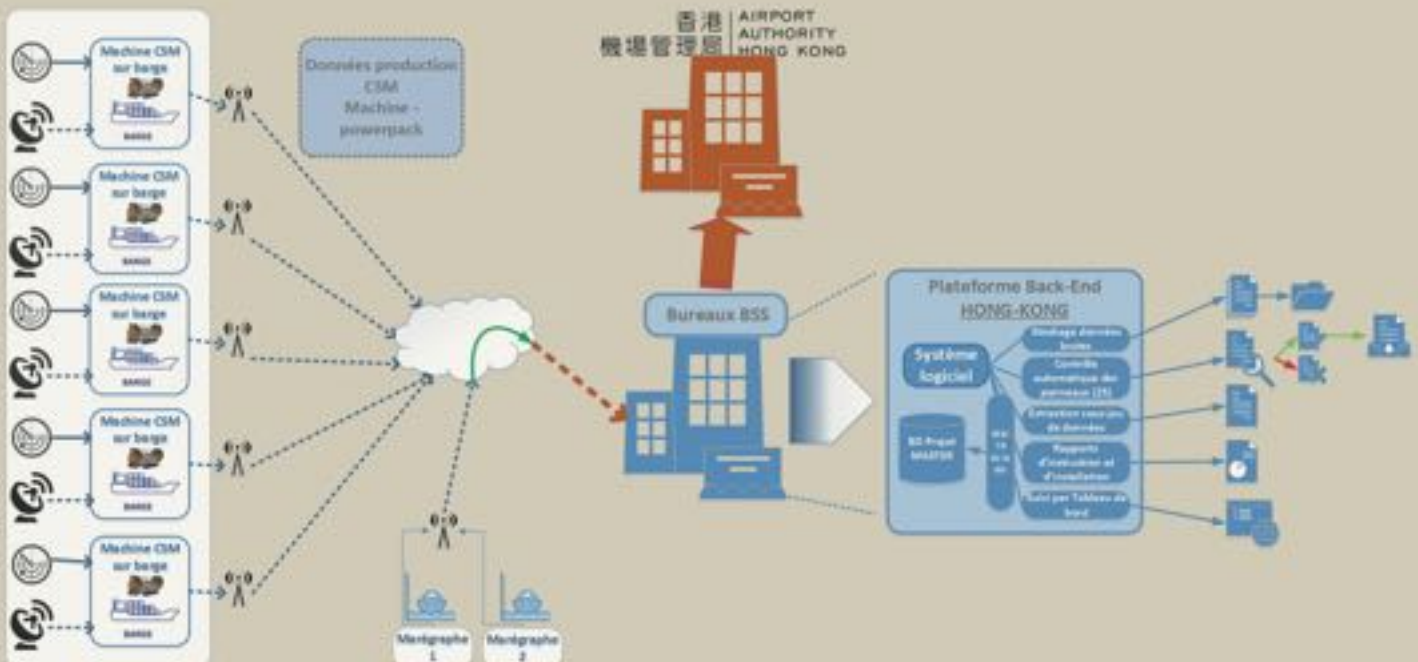
**13- Vue simplifiée du système de données Hong Kong 3205.**

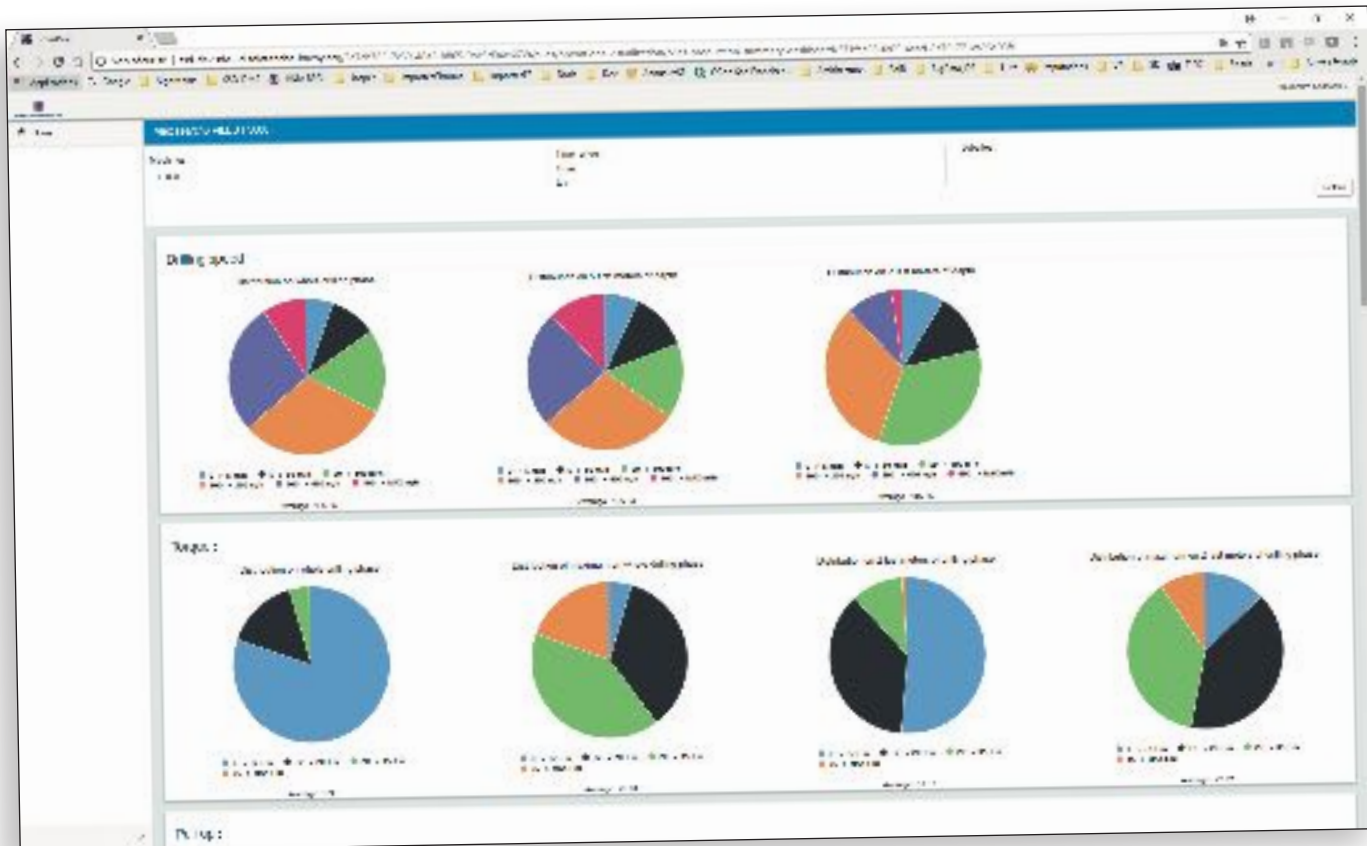
**12- Geomix machine on barge, Hong Kong 3205.**

**13- Simplified view of the data system, Hong Kong 3205.**

minutes ! Au cours de ce processus, un enregistrement des valeurs *as built* finales est stocké en base de données, puis un tableau de bord web en ligne de suivi de la progression du chantier est automatiquement mis à jour. Les indicateurs et statuts relatifs à la production de tout nouveau panneau sont en fin de compte rafraîchis automatiquement quelques instants après la fin de la cimentation (figure 13). Les données brutes et le rapport de production en format pdf de chaque panneau sont envoyés à l'Autorité aéroportuaire de Hong Kong par l'équipe

VUE SIMPLIFIÉE DU SYSTÈME DE DONNÉES HONG KONG 3205





14 © SOLETANCHE BACHY

chantier par e-mail dans les 24 heures suivant l'achèvement du panneau. Ce système de données actuellement opérationnel sur chantier procure un gain de temps considérable pour produire des documents exigés par le client, ce qui ne serait même pas humainement faisable si on considère le volume total de données produites par jour. De plus, il contribue au chantier zéro-papier.

#### CAS D'UTILISATION SUR DES PIEUX

Pour les activités de forage de pieux, les données de production de pieux

ont été intégrées au système Big Data. Après récolte et ingestion des jeux de données d'environ 13000 pieux s'étalant sur deux ans, des analyses globales, puis par machine, ont été réalisées sur les répartitions des vitesses d'avance, des couples, des *pull up*, des *pull down*, des surconsommations de béton mesurées, des pressions de bétonnage, des débits de béton (figure 14).

Les phases de forage et de bétonnage ont été bien distinguées, ainsi que les intervalles de profondeurs (cinq premiers mètres, deux derniers mètres, ...) pour avoir davantage de finesse dans l'analyse. L'agrégation de données de milliers de pieux correspon-

#### 14- Application d'analyse de données de pieux.

#### 14- Pile data analysis application.

dant à l'activité de filiales sur plusieurs années donne la possibilité d'étudier les conditions d'utilisation du matériel et de mieux orienter les choix techniques d'achat de machines, par exemple.

La maintenance prédictive sera également bénéficiaire de cet outil.

#### CONCLUSION

La plateforme Big Data de Soletanche Bachy est pensée extensible : d'autres procédés et de nouvelles applications complémentaires orientées vers d'autres profils utilisateur et présentant d'autres intérêts rejoindront cet écosystème digital très cohérent qui intégrera ensuite de l'intelligence artificielle. Et ce, toujours avec les mêmes objectifs de fluidifier certaines tâches du quotidien, d'analyser et de faire parler les données, puis d'optimiser les techniques et procédés. □

#### ABSTRACT

### DIGITAL TECHNOLOGY IN FOUNDATION WORK

A. SCARWELL, SOLETANCHE BACHY - J.-F. MOSSER, SOLETANCHE BACHY

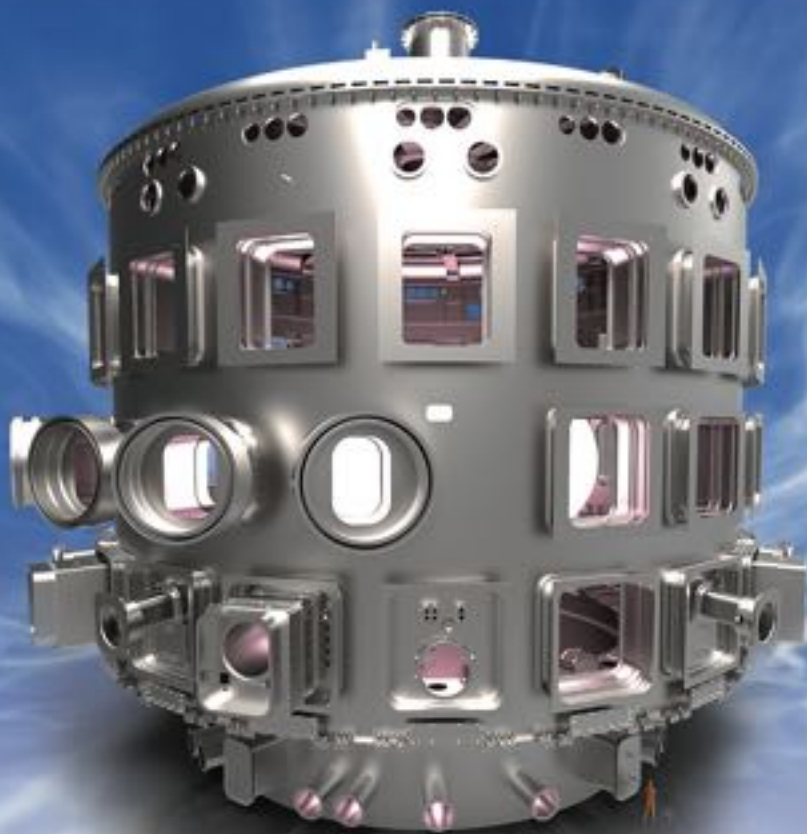
**Soletanche Bachy is a pioneer in the introduction of technical information systems in geotechnical work processes. Today, digital technology is used in order to speed up, visualise, rationalise, consolidate and archive engineering, design and production processes. Three types of solutions are described, which can either function in an ecosystem and therefore be complementary, or function independently according to the context and size of the project: jet grouting work and the GrouIT software suite, drilling assistance by supervision and big data with the example of the Hong Kong Airport extension project.** □

### TECNOLOGÍA DIGITAL EN LOS CIMIENTOS

A. SCARWELL, SOLETANCHE BACHY - J.-F. MOSSER, SOLETANCHE BACHY

**Soletanche Bachy es pionero en la introducción de la informática técnica en los procedimientos de las obras geotécnicas. Actualmente, la tecnología digital se utiliza para acelerar, visualizar, racionalizar, fiabilizar y archivar los procesos de estudio, diseño y producción. Se presentan tres tipos de soluciones, que pueden funcionar en ecosistema, y por tanto ser complementarias, u operar de forma independiente en función del contexto y el tamaño de la obra: los trabajos de inyección y el paquete de software GrouIT, la asistencia a la perforación por supervisión y el Big Data, con el ejemplo de la obra de ampliación del aeropuerto de Hong Kong.** □





↑ © ITER

# ITER

## LE DÉFI DU III<sup>e</sup> MILLÉNAIRE

AUTEURS : ALAIN BAUDRY, CHEF DE PROJET BÂTIMENTS NUCLÉAIRES, EGIS - MARC POSTOLLEC, CHIEF ENGINEER, EGIS

RECRÉER SUR TERRE LA RÉACTION DE FUSION NUCLÉAIRE À L'ŒUVRE DANS LES ÉTOILES POUR LIBÉRER UNE SOURCE D'ÉNERGIE SÛRE, INTARISSABLE ET PLUS RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT : CE RÊVE ANIME LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE DEPUIS LES ANNÉES SOIXANTE. IL SE CONCRÉTISE AUJOURD'HUI AU SEIN DU PROJET INTERNATIONAL ITER, DONT LES PREMIERS BÂTIMENTS SORTENT PROGRESSIVEMENT DE TERRE PRÈS D'AIX-EN-PROVENCE, DANS LE SUD DE LA FRANCE. UN CHANTIER ORCHESTRÉ DEPUIS 2010 PAR LE CONSORTIUM ENGAGE, QUI RASSEMBLE QUATRE PARTENAIRES EUROPÉENS, DONT EGIS. POINT D'ÉTAPE SUR CE PROJET EXTRAORDINAIRE.

### LE PROJET

Le projet ITER consiste à recréer la réaction de fusion d'atomes d'hydrogène telle qu'elle se déroule au cœur du soleil (figure 1). L'objectif est de démontrer la faisabilité en produisant dix fois plus d'énergie que celle injectée, soit 500 MW, pendant plusieurs minutes. La réaction physique n'a pu être démontrée sur Terre à ce jour que pour 15 MW pendant quelques secondes. Elle pourrait représenter une variante durable à tous les modes actuels de production d'énergie.

### LE PRINCIPE DE LA FUSION

Cette réaction est répandue dans tout l'univers puisqu'elle est le processus de fabrication et de combustion de toutes les étoiles.

Une des difficultés, toutefois, est qu'elle intervient par exemple dans le noyau du soleil, là où la température dépasse 15 millions de degrés et la gravité allègrement les 50 g (figure 2), c'est-à-dire plus de 50 fois la gravité terrestre.

Or, un des principes de la fusion est de confiner le plasma si fortement que

les atomes deviennent beaucoup plus proches les uns des autres.

**1- Vue du Tokamak et de l'enveloppe de la chambre confinant le plasma.**

**1- View of the Tokamak and the shell of the plasma confinement chamber.**

### COMMENT FAIRE SUR TERRE ?

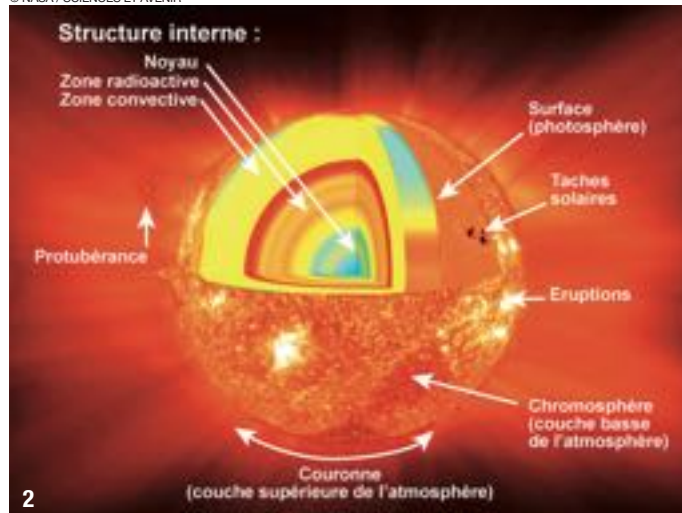
Puisqu'on ne peut pas aujourd'hui agir sur la gravité, c'est la température (et donc le niveau d'énergie des particules) qui sera beaucoup plus élevée que dans le soleil.

Il faudra porter le plasma à plus de 150 millions de degrés pour recréer l'équivalent des conditions solaires permettant l'ignition de la fusion nucléaire. Notons toutefois qu'il ne s'agit là que

de recréer la plus simple de toutes les réactions de fusion, c'est-à-dire associer 2 des plus petits des atomes connus (l'hydrogène).

Les réactions permettant de créer des atomes plus lourd (et permettant ainsi de fusionner le plomb en or !) nécessitent la mise en œuvre d'énergies bien plus colossales.

Ainsi, au-delà d'une certaine taille de noyau atomique, la fusion n'est possible qu'au cœur d'explosions de supernovae ou même au-delà... (figures 3 et 4).



2



3

2- Structure interne du soleil.

3- La nébuleuse du Crabe.

4- Table de Mendeleïev indiquant l'origine de fabrication des éléments.

2- Internal structure of the sun.

3- The Crab Nebula.

4- Mendeleïev Table indicating the component production source.

**LE PLASMA ET SES ENJEUX**

Démontrer la faisabilité de la pré-production d'électricité sur la base de la fusion, c'est maîtriser le plasma. C'est-à-dire le confinement d'une très petite quantité de matière (comparé aux autres énergies), mais très énergétique et donc difficile à confiner. Le plasma peut se comparer à un ballon gonflé que l'on essaierait de comprimer entre ses mains. Dans ces conditions, des aimants très puissants sont utilisés pour maintenir la forme du plasma dans l'enceinte. Il est en effet nécessaire d'éviter tout contact avec les parois, qui subissent déjà un flux thermique extrêmement important, de l'ordre de 5 MW/m<sup>2</sup> à 20 MW/m<sup>2</sup> dans le *divertor*, soit dix fois plus que l'énergie reçue par un vaisseau spatial lors de la rentrée dans l'atmosphère (figure 5).

La réaction de fusion se compare à une course de voitures sur un anneau, où on fait rouler les voitures de plus en plus vite, on ferme les sorties, on fait rentrer plus de voiture et on vise le carambolage en série. Ce carambolage symbolise la percussio des atomes d'hydrogènes entre eux (figure 6).

**RÉSUMÉ DU PROJET**

Le projet se compose d'une quarantaine de bâtiments, réalisés par l'agence européenne F4E.

**Processus astrophysiques à l'origine des éléments chimiques**

Tableau périodique adapté de Mendeleïev

1 H	Big Bang Fusion																Rayons cosmiques Spallation, fission										2 He				
3 Li	4 Be	Etoiles neutrons Merges, processus r														Supernovae Explosion d'étoiles massives										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	Etoiles peu massives Fusion, processus s														Novae Explosion de naines blanches										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn															
87 Fr	88 Ra																														
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu															
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																										

4



5- Équivalence énergétique des combustibles.

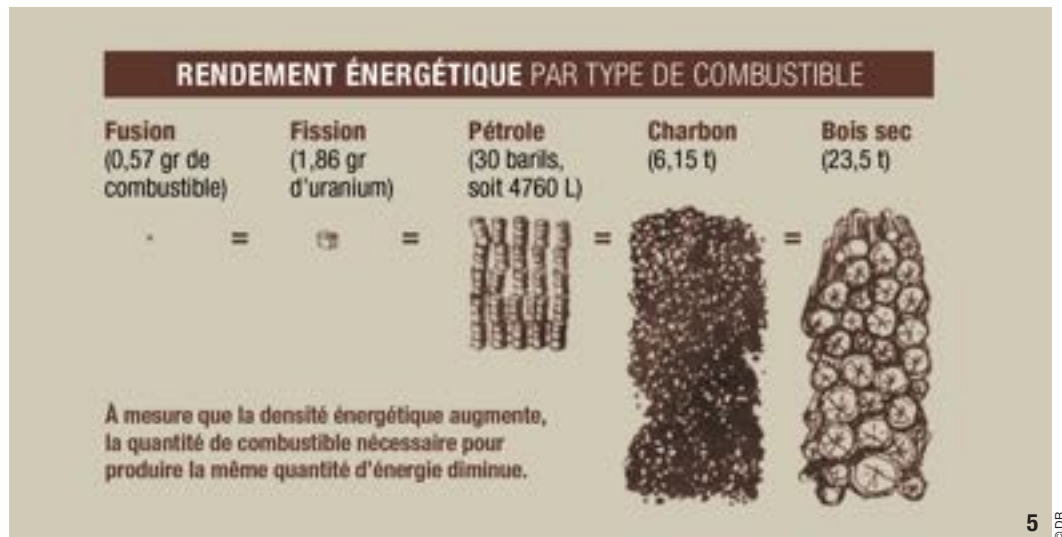
6- Course de voiture.

7- Vue du chantier du bâtiment Tokamak Complex et Assembly.

5- Energy equivalence of fuels.

6- Car race.

7- View of Tokamak Complex and Assembly building site.



5 © DR

Deux sont nucléaires et abritent un Tokamak confinant 800 m<sup>3</sup> de plasma à cent cinquante millions de degrés. Le coût total estimé avoisine les treize milliards d'euros.

Le projet regroupe 10 millions de composants fabriqués dans toutes les agences (7 pays dont l'Europe), dont un million pour le seul Tokamak. Celui-ci est abrité dans un groupe de bâtiments appelé Tokamak Complex, qui incorpore le bâtiment à Tritium et le bâtiment de mesure Diagnostic (figure 7).

Tout autour du Tokamak Complex, se situent des infrastructures qui visent à assurer les fonctions nécessaires à la machine, à savoir les alimentations électriques haute puissance, l'injection dans le plasma sous format de micro-ondes, l'usine cryogénique alimentant les aimants supraconducteurs, les bâtiments de secours et de conduite des opérations.

Ceci représente une quarantaine d'installations qu'il faut également construire.



6 © BF



7

© ENGAGE





8

© ENGAGE

## STADE D'AVANCEMENT DU PROJET

« Nos missions vont de la conception, l'aspect procurement avec les entreprises, la supervision des travaux, jusqu'à leur réception. Pour chacune d'entre elles, nous allons chercher les meilleures compétences au sein des différents partenaires », explique Gilles Schartle, directeur du projet chez Egis. Aujourd'hui, 230 personnes sont mobilisées au sein d'Engage sur le site de Cadarache. Parmi elles, une trentaine de collaborateurs Egis, notamment à la direction de projet ainsi qu'au pilotage du planning et de la construction. À cela s'ajoutent des sollicitations ponctuelles

**8- Vue du chantier du bâtiment Tokamak Complex et Assembly.**

**9- Pièce de transition de la couronne modélisée aux éléments finis.**

**8- View of Tokamak Complex and Assembly building site.**

**9- Transition part of the crown modelled by finite element method.**

des différentes sociétés d'Egis pour du design de structure complexe et des études particulières (protection par rapport à la foudre, réseaux enterrés, etc.). Le projet est actuellement en phase de réalisation des infrastructures et des bâtiments. Le bâtiment central Tokamak est sorti de terre puisque l'on construit son quatrième niveau (sur huit). Environ 350 compagnons se relaient sur cet ouvrage en deux postes.

Autour du Tokamak, quatre Bâtiments Auxiliaires sont clos et couverts, dans lesquels les corps d'états techniques démarrent.

Les autres Bâtiments Auxiliaires sont en plein gros œuvre. ITER est donc une

somme d'une dizaine de gros chantiers (figures 7 et 8).

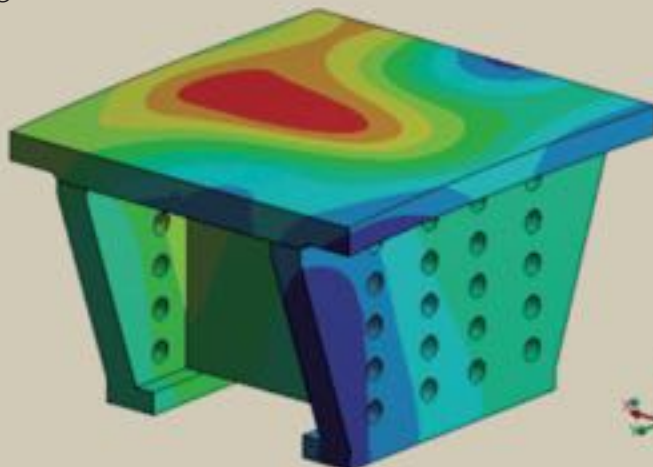
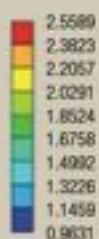
Du côté des infrastructures, la première sous-station très haute tension (400 kV) a été livrée. Enfin, certaines zones aménagées de la plateforme vont être très prochainement livrées à ITER pour l'arrivée des entreprises d'Assemblage du process.

En tout, environ mille huit cent personnes s'affairent sur ce chantier complexe et dense, toujours dans des délais et avec un niveau de qualité et de sécurité exigeants.

Une des principales difficultés du projet réside dans sa taille, qui nécessite d'autres moyens d'organisation ; chaque sujet qui pourrait passer inaperçu ailleurs prend ici de telles dimensions qu'il faut généralement lui dédier des ressources particulières pour lui trouver une solution.

## PIÈCE DE TRANSITION DE LA COURONNE MODÉLISÉE AUX ÉLÉMENTS FINIS

**8: Linear Elastic**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 51  
Max: 2.5589  
Min: 0.9631



## INVENTIVITÉ, TECHNOLOGIE ET INNOVATIONS DÉPLOYÉE PAR ENGAGE

Engage, joint-venture rassemblant 4 ingénieristes européens (l'anglais Atkins, le français Assystem, l'espagnol Empresarios Agrupados et Egis) est dans une démarche constante de créativité pour affronter le défi que pose la complexité du projet ITER : au-delà de la technicité de ce projet, le volume de l'opération, le niveau de sécurité et de fiabilité aligné sur les plus hauts standards sont des éléments qui conduisent Engage à développer une expertise féconde dans tous les domaines de sa mission d'ingénierie. ▷

© ENGAGE

9



- L'originalité essentielle du projet repose sur la maquette numérique gérée en 3D *as master* dont Engage assure le pilotage et la gestion pour la partie bâtiments, pour garantir la convergence des concepts bâtiment /et procédés, gérer en configuration les données d'entrée, identifier et résoudre les interfaces, maîtriser les modifications.
- En complément de cette mission permanente de synthèse technique et spatiale, Engage développe une technologie 4D pour illustrer l'avancement et le lien modèle - planning.
- Création de la couronne : le concept original pour soutenir le réacteur à partir de la base du niveau B2 était de prévoir 18 colonnes d'acier circulaires boulonnées sur le radier. Cependant, en raison de l'évolution des charges et des marges prises pour le Tokamak, les colonnes en acier n'étaient plus réalisables. Engage a entrepris une série d'études de faisabilité pour créer une nouvelle structure support : une large couronne en béton. Ainsi, la conception de la couronne est un bon exemple de la technologie et de l'innovation qu'Engage a développées dans le projet (figure 11).
- L'intégration de tolérance de pose au titre de provision de design.
- La création de platines circulaires, les platines avec position d'ancrage adaptative permettant de résoudre les conflits avec les aciers du béton sans altérer la capacité des platines.
- La détection automatique de clashes depuis le logiciel Catia, l'automatisation du transfert de la maquette numérique en vue d'extractions exploitables par l'entreprise (3D/2D).
- Le scellement de cadres métalliques au pourtour des trémies installées dans des parois de confinement. L'objectif est de mettre en œuvre, après passage des réseaux, des taux d'étanchéité extrêmement exigeants à la traversée des réseaux.
- La reconstruction 3D du ferrailage béton tel que construit : une campagne de scan 3D (testé actuellement) est réalisée sur les structures de génie civil avant coulage du béton. Ensuite ce nuage est alors converti en ortho-images 3D implémentables dans la maquette numérique et exploitables par la réalité augmentée. Cette dernière pourrait permettre de vérifier sur site la position du ferrailage de voiles et dalles (figure 10).

**10- Scan des platines intégré dans le modèle 3D.**

**11- Différentes étapes de la conception de la couronne.**

**12- Cycle d'intégration.**

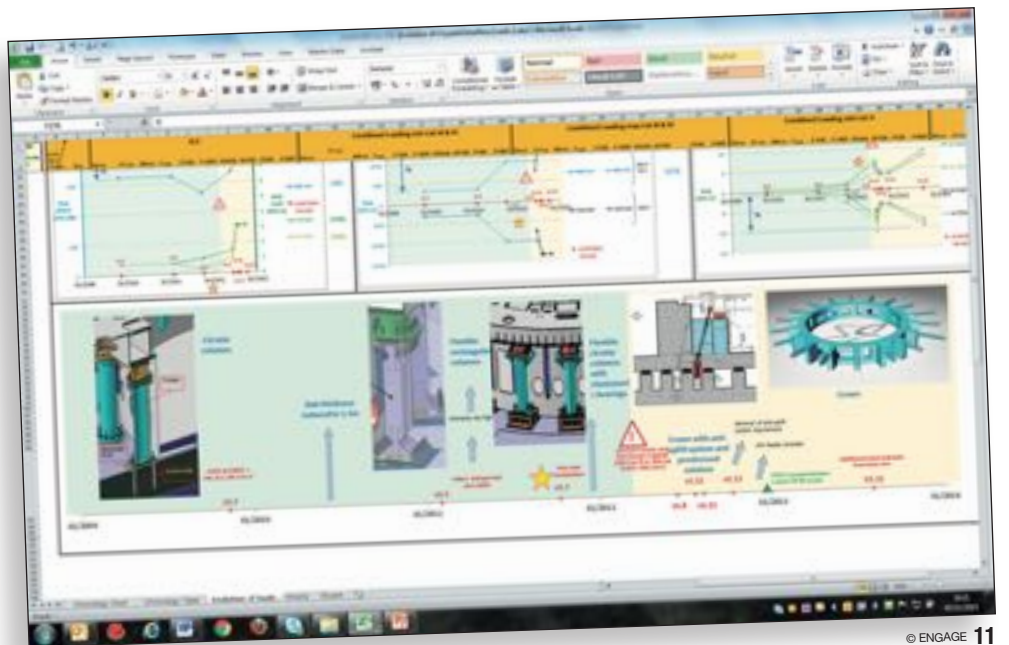
**10- Scan of the plates included in the 3D model.**

**11- Various stages in crown design.**

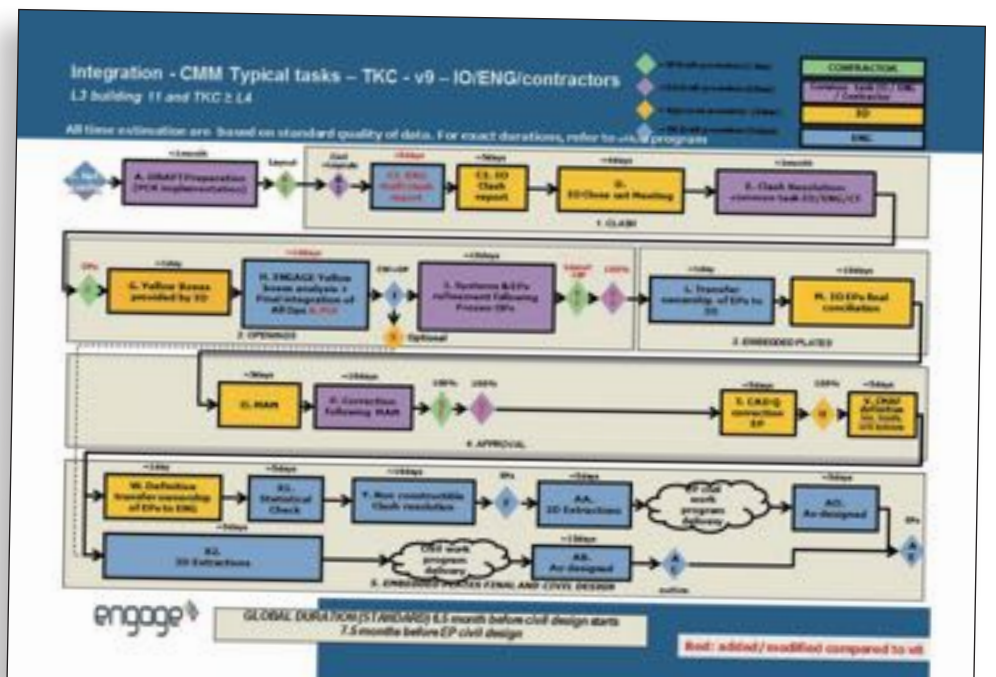
**12- Integration cycle.**



10 © ENGAGE



11 © ENGAGE



12 © ENGAGE



© ENGAGE 13

- 13- Revue de maquette 3D.
- 14- Base de données d'exigences de sûreté nucléaire.
- 15- Base de données de configuration.

- 13- 3D model review.
- 14- Database of nuclear safety requirements.
- 15- Configuration database.

### PLURIDISCIPLINARITÉ ET CAPACITÉ D'INTÉGRATION

L'équipe d'Engage est constituée d'environ deux cent trente personnes dont un quart est espagnol et un quart est anglais, avec environ quinze nationalités. D'autre part, un large volet de compétences est représenté : les fonctions de design de bâtiments et d'infrastructures, de gestion de projet, de supervision de la construction, qualité et sûreté.

Cette équipe évolue au contact rapproché (sur le même site) d'un client lui-même composé de nationalités très diverses (les principales étant européenne, américaine, chinoise, indienne, japonaise, russe et sud-coréenne !). Tout ceci nécessite une compréhension minimale des autres cultures (ne serait-ce qu'européennes) sous peine de contresens.

Engage a par exemple produit un guide de conduite des réunions vues selon chaque nationalité.

La communication entre les personnes est déjà difficile entre des français, car c'est une affaire d'écoute ; mais lorsqu'on s'exprime en anglais, on perd facilement 50% de ses capacités à exprimer une idée dans tout son contexte et sa subtilité. Dès lors, la compréhension mutuelle devient beaucoup plus *challenging* !

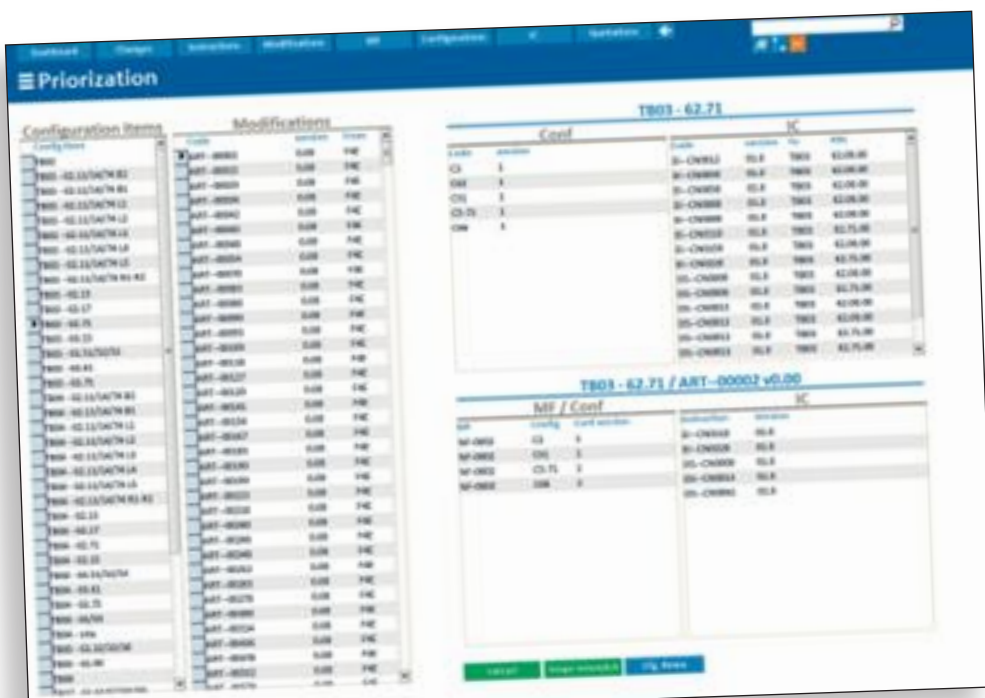
L'ingénierie a, d'autre part, à la fois intégré des outils déjà développés par le client ITER : par exemple implémentation des PID sur un outil dédié avec catalogues, utilisation extensive d'une base de données BIM 3D impressionnante (plus de huit mille modèles) ; mais Engage a aussi créé et développé des outils et méthodes en partie reprises par ITER et intégrées par les autres agences nationales, comme par exemple le processus d'ingénierie simultanée sur le modèle 3D.

En effet, lorsque la conception est éclatée dans le monde entier, sur un nombre très important de maquettes 3D unitaires, il est difficile, d'une part, de savoir où en est la maturité du design pour chaque partie et, d'autre part, de s'assurer que chacun travaille sur la même zone et sur la même phase d'implémentation.

La gestion des exigences de sûreté nucléaire des bâtiments a également été développée par Engage sur une base de données, afin de permettre une traçabilité des exigences, de leurs versions, et de la manière dont elles ont été adressées par les différents designers et constructeurs en aval (figure 14).



14 © ENGAGE



15 © ENGAGE



La gestion de configuration de tous les intervenants sur une base dédiée a également été développée pour faire face au volume très important de modifications (une par jour en moyenne), de taille très variable, et impactant le référentiel d'études et de construction en permanence. Dans ces conditions, il est important de savoir quelles modifications ont été embarquées dans quelle partie de design, afin de connaître l'état de chaque objet (figure 15).

#### APPORT DE L'INGÉNIERIE

**Passer de l'idée à la réalisation :** le Tokamak Complex est une structure monolithique en béton armé de 9000 m<sup>2</sup> au sol, totalisant 390 000 t supportée par 493 appuis antisismiques.

Engage a produit les études de structure conduites à partir d'une modélisation aux éléments finis sur le logiciel Ansys comprenant 173 000 nœuds et 220 000 éléments.

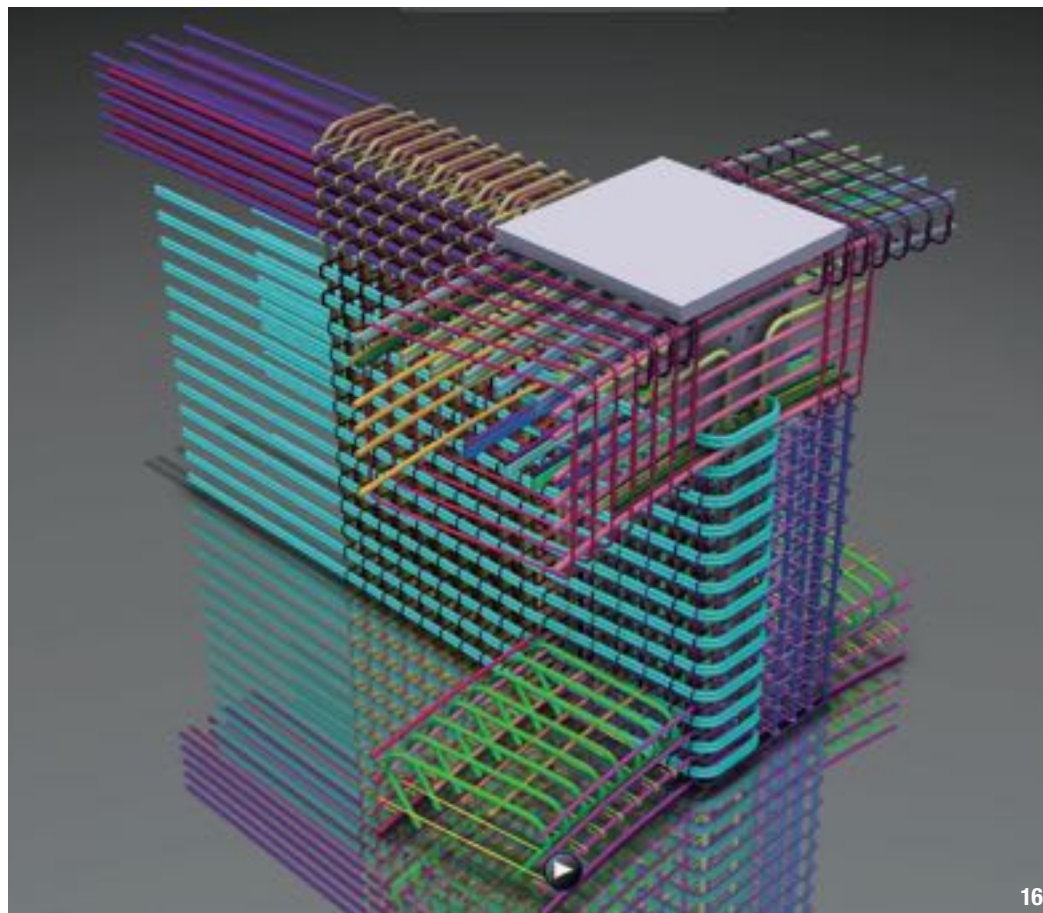
Outre les proportions exceptionnelles de cette modélisation "coque", il convient de signaler qu'Engage l'a couplée avec le simulateur du cryostat (25 000 t) développé par ITER pour une prise en compte représentative de l'interaction machine/bâtiment.

Le modèle "coque" ayant été jugé limité pour l'analyse de certaines singularités, les études ont été complétées, dans une démarche innovante, par une modélisation volumique de la couronne supportant la machine (densité d'armatures atteignant 600 kg/m<sup>3</sup> de béton). Cette zone complexe a nécessité l'emploi de logiciels spécifiques 3D pour garantir la constructibilité du ferrailage (figure 16). Une maquette du mur circulaire *bioshield* à l'échelle 1 a été réalisée pour valider le principe.

**Gestion documentaire :** Engage a mis en œuvre une base de données commune à tous les acteurs du projet, qui garantit la fiabilité de l'exploitation des documents en termes d'enregistrement, de traçabilité, de diffusion et d'évolution.

Compte tenu du volume considérable d'informations et de requêtes (volume total de documents stockés de 1,87 To, 70 000 connexions mensuelles, 10 000 documents publiés mensuellement), Engage a contribué au développement de la version 4 de Sgfi et mis en place les processus d'utilisation spécifiques et les circuits de validation efficaces requis.

**Faciliter la mise en œuvre :** une des particularités du projet réside dans les platines scellées : leur nombre de



16

© ENGAGE

120 000 associé au niveau de charge des équipements supportés et à la densité des ferrailages génèrent des problèmes de constructibilité.

Depuis 2011, une dizaine d'ingénieurs experts développent des solutions techniques permettant de composer avec les contraintes de projet. Pour exploiter au mieux cette standardisation (85 %

des platines), un logiciel (Cbt) développé par Engage a été mis à la disposition de tous les concepteurs (figure 17).

#### ÉVOLUTION

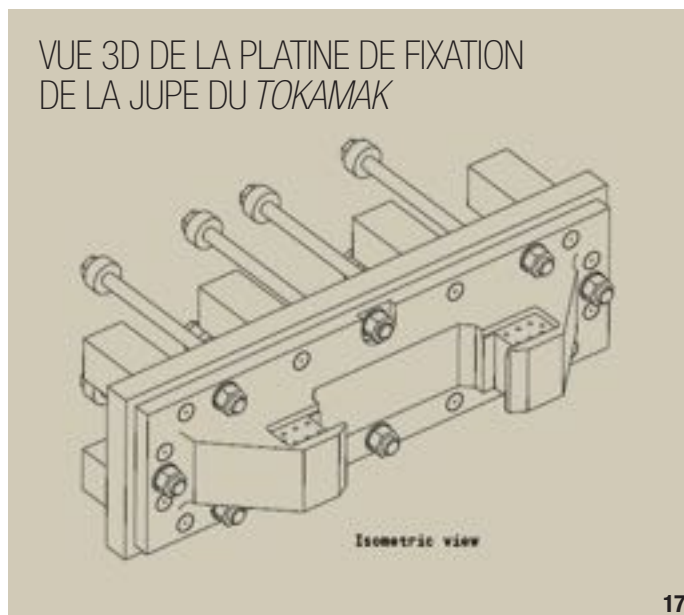
L'ingénierie a permis de passer de l'état initial de la plateforme en 2010 (figure 18) à une réalisation largement avancée (figure 19).

**16- Vue 3D du ferrailage de la couronne.**

**17- Vue 3D de la platine de fixation de la jupe du Tokamak.**

**16- 3D view of crown reinforcing bars.**

**17- 3D view of mounting plate for the Tokamak skirt.**



17

© VFR



© ENGAGE

18



© ENGAGE

19

18- Plateforme ITER en 2010.  
19- Plateforme ITER en 2017.  
20- Exemple de schéma de coordination du chantier.

18- ITER platform in 2010.  
19- ITER platform in 2017.  
20- Example of site coordination diagram.



© ENGAGE

20

superstructure est terminée, certaines zones de bâtiments sont réservées pour la pose de ponts roulants, alors que d'autres zones terminées sont livrées aux installateurs de procédés.

Cette aventure est une aventure technologique, mais aussi une aventure humaine dans laquelle sont embarqués de nombreux hommes et femmes provenant de tous horizons de la planète. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE / INDUSTRIEL EXPLOITANT :** ITER organisation
- AGENCE DOMESTIQUE EUROPÉENNE :** F4E
- ARCHITECT ENGINEER :** Engage
- BUREAU DE CONTRÔLE :** Apave
- ENTREPRISE GÉNÉRALE DE GÉNIE CIVIL :** Gtm - Vinci - Ferrovial - Razel
- ENTREPRISE DES LOTS TECHNIQUES :** Omega Axima, Ineo, Endel, M+W)
- ENTREPRISE PONTS SPÉCIAUX :** Nkm - Reel
- ENTREPRISE GÉNÉRALE BÂTIMENTS MAGNET :** Ferrovial

## ABSTRACT

### ITER: THE CHALLENGE OF THE THIRD MILLENNIUM

ALAIN BAUDRY, EGIS - MARC POSTOLLEC, EGIS

**ITER will be the biggest experimental nuclear fusion facility ever built.** Its purpose is to demonstrate that industrialisation of the fusion process developed in laboratory is possible, and thus open the way for a new energy production process. This project is the result of unprecedented international collaboration between China, South Korea, Japan, India, Russia, the United States and Europe, which each supply part of the components. A European agency called F4E is in charge of construction on the site which will receive the future experimental reactor. In 2010, it awarded the project management contract to the European consortium Engage, formed by the contractors Empresarios Agrupados (Spain), Atkins (United Kingdom), and Assystem and Egis (France). □

### ITER: EL DESAFÍO DEL III<sup>er</sup> MILENIO

ALAIN BAUDRY, EGIS - MARC POSTOLLEC, EGIS

**ITER será la mayor instalación experimental de fusión nuclear jamás construida.** Su objetivo: demostrar que es posible industrializar el proceso de fusión elaborado en laboratorio y abrir así la vía a un nuevo sistema de producción de energía. Este proyecto es el resultado de una colaboración internacional sin precedentes entre China, Corea del Sur, Japón, India, Rusia, Estados Unidos y Europa, que aportan cada uno una parte de los componentes. Bautizada como F4E, la agencia europea es responsable de la construcción de la planta que acogerá el futuro reactor experimental. En 2010, encargó la promoción del proyecto al consorcio europeo Engage, formado por las empresas Empresarios Agrupados (España), Atkins (Reino Unido), Assystem y Egis (Francia). □





# PKW ET TIRANTS EXCEPTIONNELS : COUP DOUBLE POUR LE BARRAGE D'HAZELMERE (AFRIQUE DU SUD)

AUTEURS : DUANE BOYSE, DIRECTEUR TECHNIQUE, INGEROP SOUTH AFRICA - ADAM BOTHA, DIRECTEUR TECHNIQUE ,  
INGEROP INTERNATIONAL CONSULTANTS - CLAUDE BESSIERE, DIRECTEUR INNOVATION, GROUPE INGEROP

LE « DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION » (DWS) EXPLOITE DEPUIS 1977 LE BARRAGE D'HAZELMERE SITUÉ AU KWAZULU-NATAL, SUR LA RIVIÈRE MDLOTI. SA CONCEPTION DEVAIT PERMETTRE DE DOUBLER À TERME SA CAPACITÉ DE STOCKAGE EN REHAUSSANT, 35 ANS APRÈS SA CONSTRUCTION, LE NIVEAU DE LA RETENUE DE 7 m. QUAND LES BESOINS EN EAU ONT RENDU NÉCESSAIRE CETTE AUGMENTATION DE CAPACITÉ, L'HYDROLOGIE, COMME LES NORMES DE SÉCURITÉ, AVAIENT ÉVOLUÉ. DES SOLUTIONS INNOVANTES ONT DÛ ÊTRE DÉVELOPPÉES POUR GÉRER LES CRUES EXTRÊMES ET GARANTIR LA STABILITÉ APRÈS REHAUSSE.

## LA CONCEPTION INITIALE

Destiné à l'irrigation et à l'alimentation en eau de la zone en pleine urbanisation au nord de Durban, le barrage, construit en 1975-1976 à une longueur totale en crête de 457 m, avec un tracé en plan suivant un rayon de 725 m (figure 2). Sa hauteur maximale sur fondation est de 50 m environ.

La rehausse du niveau normal de la retenue de 7 m, prévue dès l'origine, sans relever le niveau de la crête, permet de plus que doubler la capacité utile du réservoir (37 millions de m<sup>3</sup> au niveau 93, au lieu de 17,9 millions de m<sup>3</sup> au niveau 86).

Le barrage de type poids a été construit par plots (32 au total) d'environ 15 m

**1- Le PKW (Piano Key Weir) terminé en décembre 2017.**

**1- The completed PKW (Piano Key Weir) in December 2017.**

de largeur (figure 3). Au droit du lit de la rivière, 7 de ces plots supportent l'évacuateur de crues d'une longueur de 103 m (figures 4) avec un seuil libre à la cote 86, soit 8 m en dessous de la crête des plots non déversants (cote 94).

La capacité de cet évacuateur était estimée à 1 472 m<sup>3</sup>/s.





© DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION

2

La conception initiale de la rehausse de 7 m du niveau de la retenue, prévoyait d'équiper les 7 passes de l'évacuateur de vannes segments, sans toucher aux plots non déversants.

### LA CONCEPTION DU NOUVEL ÉVACUATEUR DE CRUES

Lorsqu'en 2012 le DWS (Department of Water Sanitation) a décidé d'engager la rehausse de 7 m du plan d'eau (cote de 93 au lieu de 86) et a mandaté Ingerop South Africa, les hypothèses à prendre en compte étaient les suivantes :

- La crue centennale (débit de pointe entrant 1 360 m<sup>3</sup>/s) devait être évacuée pour une cote inférieure à celle de la crête des plots latéraux (cote 94) ;
- Lors de la crue maximale régionale (3 200 m<sup>3</sup>/s), la cote du dessus du parapet en béton existant sur ces plots, de 1,5 m de hauteur (cote 95,5), ne devait pas être significativement dépassée ;

2- Vue d'ensemble des travaux de rehausse en novembre 2017.

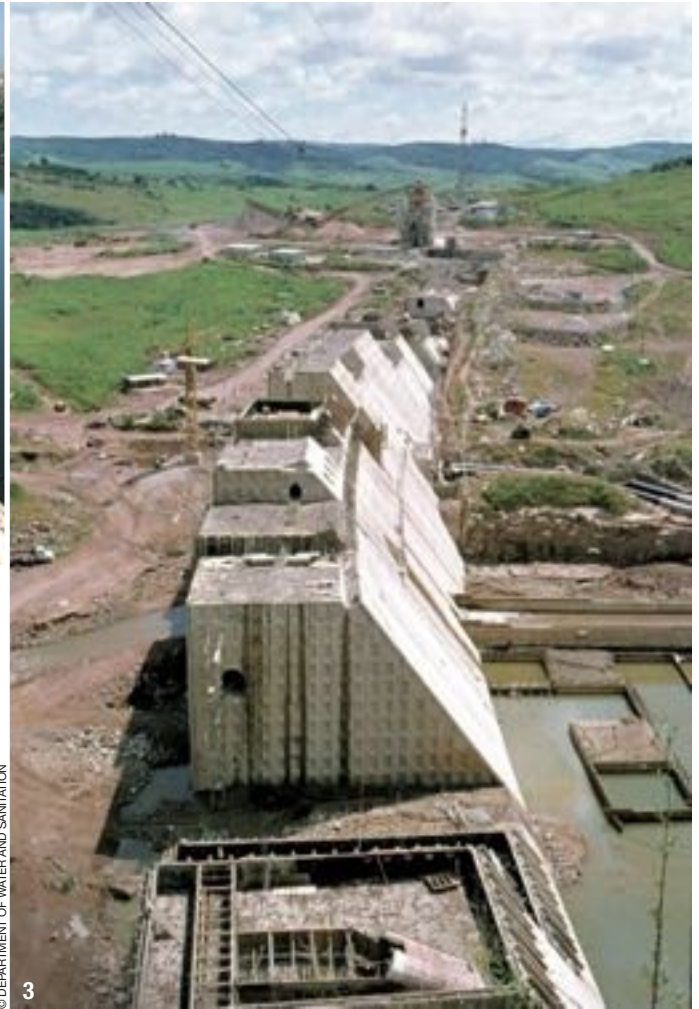
3- Construction du barrage - mars 1975.

4a & 4b- L'évacuateur de crues initial.

2- General view of the level raising works in November 2017.

3- Dam construction - March 1975.

4a & 4b- The initial spillway.



© DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION

3

→ La crue de référence pour l'évaluation de la sécurité du barrage (4 300 m<sup>3</sup>/s) ne devait conduire qu'à des déversements limités au-dessus de ces parapets.

Ces critères, conjugués avec, d'une part, la topographie du bassin versant conduisant en cas de fortes pluies à un temps de concentration très court de l'ordre de 6 à 12 heures, complexifiant

la gestion de l'ouverture des vannes, et, d'autre part, le souhait de l'exploitant de minimiser les contraintes de maintenance, ont conduit très vite à étudier d'autres solutions que les vannes-segments, solutions visant à réduire la hauteur de la lame déversante, telles que les hausses fusibles labyrinthe et les Piano Key Weirs (PKW). ▷



© DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION

4a



4b



Cette dernière option assurant la gestion des crues sans aucune intervention d'un opérateur ni nécessité de remise en place des hausses fusibles après basculement en cas de crue importante, a été retenue par DWS en 2012.

Le concept de PKW a fait l'objet de nombreuses études et recherches, les experts du monde entier échangeant leurs résultats à l'occasion d'ateliers internationaux spécifiques (le premier s'est tenu à Liège en Belgique en 2011, le second à Paris en 2013 et le 3<sup>e</sup> à Qui Nhon au Vietnam en février 2017). Lors du choix de la solution PKW en 2012, les résultats des recherches alors disponibles pour optimiser la géométrie (seuls 8 projets de PKW avaient été réalisés à l'époque) ont servi de référence au concepteur qui a dû ajuster les dispositions optimisées théoriques à l'ouvrage existant, et tenir compte en particulier des joints entre plots, et du fait que le plot central était moins large que les autres.

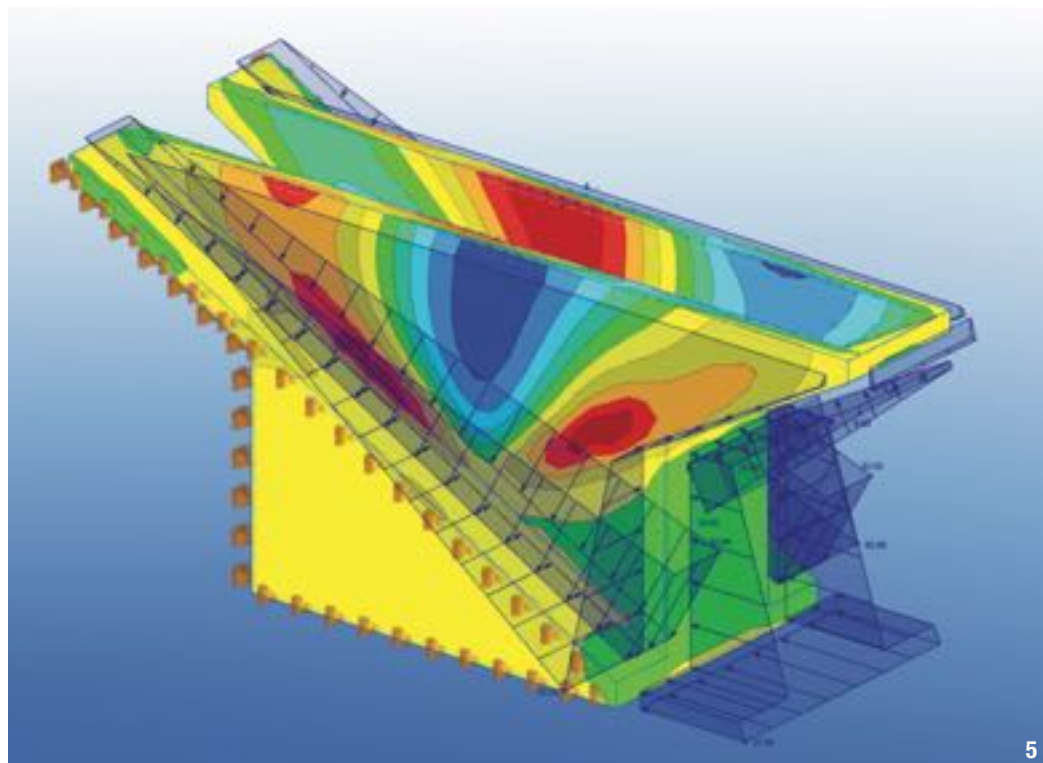
D'abord étudiées grâce à un modèle numérique aux éléments finis (figure 5), les dispositions retenues ont ensuite été testées sur un modèle réduit hydraulique construit dans le laboratoire du DWS à Pretoria (figure 6).

Les résultats des essais sur modèle réduit ont permis de vérifier les conditions d'évacuation des principales crues. Ces résultats sont présentés dans le tableau A.

On notera en particulier que le débit évacué pour le niveau 95,50 de crête du parapet en béton est 4000 m<sup>3</sup>/s. L'ensemble du PKW, d'une longueur totale de 103 m, couvre le plot central du barrage de 13 m de largeur et, symétriquement de part et d'autre, les 3 plots adjacents de 15 m de largeur. La figure 7 montre les dispositions retenues vues en plan, et la figure 8 en coupe verticale.

L'épaisseur des voiles en crête est de 0,50 m, ce qui conduit à un ratio L/W de 6,5 entre la longueur développée de la crête du PKW mesurée dans l'axe des voiles L, et la largeur totale du seuil W.

Le positionnement du PKW par rapport au seuil existant a fait l'objet de réflexions particulières afin de conjuguer au mieux les effets sur la stabilité du seuil et sur la dissipation de l'énergie. Les études sur modèle ont donc également analysé les conditions de dissipation de l'énergie sur la partie basse du seuil afin de minimiser les travaux nécessaires pour assurer l'aération de la nappe.



5

© INGEROP

Les dispositions finales nécessitent la démolition des piles, et du seuil existant sur une hauteur de 3 m, ainsi que la construction d'une nouvelle structure de 10 m de hauteur totale et 21,60 m de longueur amont-aval.

La figure 9 montre les travaux de démolitions des piles et du seuil existant,

**5- Modélisation numérique.**

**6- Modèle réduit hydraulique.**

**5- Digital model.**

**6- Hydraulic scale model.**



6

© INGEROP

tant, qui ont nécessité un abaissement provisoire du plan d'eau, les figures 10 les premières phases de construction du PKW et les figures 1 et 11 l'ouvrage terminé (photographié en décembre 2017) respectivement vu de dessus et vu de l'amont.

À noter également un des objectifs du phasage de construction, qui était de pouvoir remplir le réservoir au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Ce phasage a été mis au point en intégrant les travaux d'ancrage.

Lors du 3<sup>e</sup> atelier international sur les PKW de février 2017, un recensement mondial des évacuateurs de ce type a été établi. Il a permis d'identifier une trentaine d'ouvrages, dont la moitié environ en France, alors réalisés (le premier en 2006), ou en construction (voir le site web dédié : <http://www.pk-weirs.ulg.ac.be/?q=content/world-register-pkw>).

Celui d'Hazelmere ressort comme étant en 2017 celui de plus grande hauteur et de loin, et comme l'illustration de la possibilité de construire un très grand PKW sur un barrage existant.

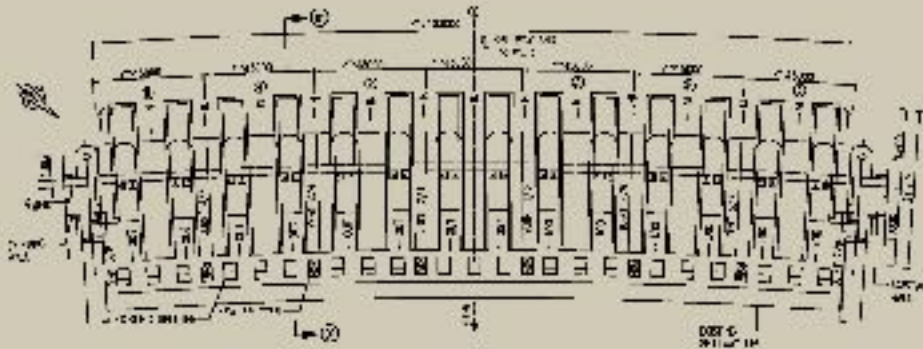
TABLEAU A : CONDITIONS D'ÉVACUATION DES PRINCIPALES CRUES

Crue	Débit de pointe	Débit évacué	Niveau du réservoir
1:50	1090 m <sup>3</sup> /s	1080 m <sup>3</sup> /s	93.95
1:100	1360	1347	94.16
1:200	1660	1645	94.40
Maximum régionale	3200	3175	95.62
Référence	4300	4288	96.20

#### LA STABILITÉ FINALE DE L'OUVRAGE APRÈS REHAUSSE

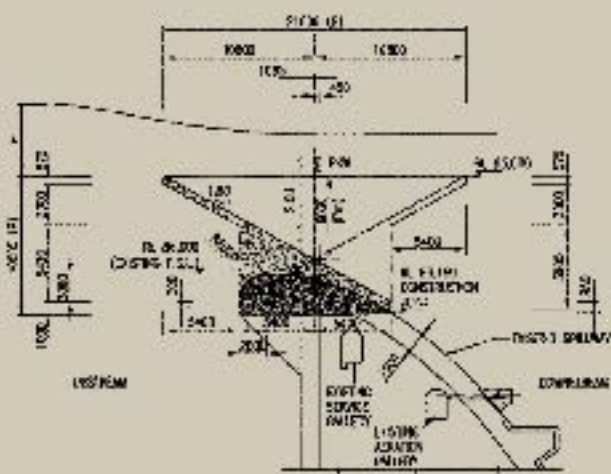
Compte tenu des nouvelles hypothèses de vérification de la stabilité au renversement et au glissement et des contraintes en pieds amont et aval, une fois le niveau normal de la retenue rehaussé (passage de la crue de réfé-

## VUE EN PLAN DU PKW (PIANO KEY WEIR)



7

## COUPE VERTICALE DE PRINCIPE DU PKW (PIANO KEY WEIR)



8

7- Vue en plan du PKW (Piano Key Weir).

8- Coupe verticale de principe du PKW (Piano Key Weir).

9- Démolition de l'évacuateur existant.

7- Plan view of the PKW.

8- Schematic vertical section of the PKW.

9- Demolition of the existing spillway.



9

rence conduisant à un niveau amont de 96,20 pour un niveau aval de 52), les études ont montré qu'il était nécessaire d'améliorer les coefficients de sécurité obtenus en ancrant le barrage dans le sol au moyen de tirants précontraints. Le barrage d'Hazelmere est fondé sur des grès quartzitiques et arkosiques de la région du Natal, dont le comportement mécanique est fortement influencé par le pendage des différents bancs et la présence de lits intermédiaires de matériaux silteux micacés. Lors de la réalisation en 2012 de sondages de reconnaissance de 90 m de profondeur, on a constaté des pertes de carottes pouvant atteindre jusqu'à 15%.

Les essais géotechniques réalisés ont conduit à retenir pour la fondation une densité de  $1,6 \text{ t/m}^3$ , une cohésion nulle et un angle de frottement interne de  $38,5^\circ$ .

Le pré-dimensionnement des renforts nécessaires à Hazelmere sur la base des paramètres géotechniques ci-dessus et du retour d'expérience des ancrages de ce type en Afrique du Sud, a conduit à envisager initialement la mise en œuvre de 243 ancrages de 3,4 MN de charge utile (25 torons de 15,7 mm de diamètre).

Ces ancrages étaient soit verticaux dans l'axe théorique du barrage et réalisés depuis la crête, soit inclinés et mis en œuvre depuis la face aval, avec des contraintes de précision de l'inclinaison des forages à 1/300 et d'implantation des têtes à l'abri des déversements sur le PKW.

Néanmoins il a été jugé prudent de commencer les travaux par une campagne de tirants d'essais afin de conforter in situ les hypothèses de charge à la rupture et de longueurs de scellement.

Le retour d'expérience de la rénovation en 2009-2010 du barrage de Catagunya en Tasmanie (Australie), 50 ans environ après sa construction (ouvrage précontraint de 49 m de hauteur, terminé en 1962, et ouvrage de ce type de plus grande hauteur à cette époque) ayant montré la faisabilité de la mise en œuvre de tirants précontraints comportant 91 torons (25389 kN de charge totale à la rupture), l'entreprise soustraitante Srg retenue par l'entreprise générale Group 5, pour la réalisation des ancrages, a proposé dans son offre de mettre en œuvre moins d'ancrages mais de plus grande capacité (entre 49 et 91 torons de 15,7 mm), la faisabilité de ces variantes restant à vérifier par les tirants d'essais.



## LES TIRANTS D'ESSAIS

Finalement 4 tirants d'essais comportant chacun 61 torons (charge totale à la rupture de 17 019 kN) ont été réalisés fin 2015 dans le terrain de fondation en pied aval du barrage, à environ 15 m à l'aval (figure 12). Trois d'entre eux (TA1 à TA3) de 34 m de longueur étaient implantés derrière l'évacuateur, et le 4<sup>e</sup> (TA4) en rive gauche, à environ 90 m au-delà du seuil déversant (longueur 36 m). L'objectif était d'atteindre soit la rupture, soit 80 % de la capacité maximale à la rupture (13,6 MN), selon la norme BS8081 :1989.



© INGEROP

10a

Les tirants TA1, TA2 et TA4 ont été mis en tension à 80 % de la capacité maximale à la rupture sans problème, en revanche le tirant TA3 s'est rompu pour un effort de 11,9 MN (70 %) du fait de la procédure de mise en tension. Ces résultats ayant montré une bien meilleure résistance de la fondation que prévue initialement, le projet définitif a pu être optimisé en conséquence. Les tirants d'essais ont également permis de mettre au point les techniques d'injection afin d'assurer l'étanchéité de la zone de scellement dans la fondation.



© INGEROP

10b

**10a & 10b- Premières phases de construction du PKW (Piano Key Weir).**

**11- Le PKW (Piano Key Weir) terminé en décembre 2017.**

**10a & 10b- Initial phases of PKW construction.**

**11- The completed PKW (Piano Key Weir) in December 2017.**



11

© INGEROP



## LES DISPOSITIONS FINALES

Le nombre final d'ancrages mis en œuvre a été de 83, dont 28 pour l'évacuateur de crues, ce qui a permis d'éviter tous les tirants inclinés.

Au total ont été réalisés 12 ancrages avec 91 torons, 31 ancrages avec 80 torons, 8 avec 61 torons (figure 13) et 32 avec 49 torons.

Les longueurs de scellement respectives retenues ont été 9 m, 8 m, 7 m et 6 m.

Soit pour les T91, ancrages de capacité maximale installés à ce jour à travers le corps d'un barrage, une longueur maximale de 90 m, à comparer avec les 60 m des mêmes ancrages réalisés au barrage de Catagunya en Australie.

Enfin les 28 tirants T80 mis en œuvre dans l'évacuateur de crues ont été également conçus pour assurer la liaison entre l'ouvrage existant et la nouvelle structure, ce qui a permis une diminution drastique des aciers en attente à prévoir dans le barrage existant.

## LES PHASES DE CONSTRUCTION

Elles ont été mises au point pour permettre un remplissage progressif du réservoir, après la phase initiale

**12- Réalisation du tirant d'essai TA 4.**

**13- Le premier tirant définitif T61 mis en œuvre à Hazelmere.**

**12- Execution of test tie anchor TA 4.**

**13- The first permanent tie anchor T61 placed at Hazelmere.**

d'abaissement du plan d'eau nécessaire pour les démolitions du seuil et des piles existantes (figure 9).

Le PKW a donc été construit par étapes :

- Voiles support des *outlets* ;
- *Inlets* jusqu'en sous face du porte à faux et réalisation des ancrages (figure 10), ce qui a permis de remonter le plan d'eau jusqu'à environ 2 m au-dessus du niveau initial de 86, et de profiter ainsi d'une partie du gain en eau ;
- Reste de la structure (figure 11).

## EN CONCLUSION

L'utilisation de tirants d'ancrage pour réhabiliter et améliorer la stabilité des barrages existants a déjà fait ses preuves sur de nombreux barrages dans le monde.

Comme les PKW ont également fait leurs preuves quant à leur efficacité pour l'évacuation des crues avec de faibles lames déversantes, il a semblé raisonnable de marier les deux sys-

tèmes afin de fournir des solutions modernes à la problématique de réhabilitation du barrage de Hazelmere. Cette combinaison a permis en outre d'optimiser le ferrailage nécessaire pour assurer la liaison entre le nouveau PKW et le seuil déversant en place. Enfin le souhait de l'exploitant de ne pas avoir d'intervention humaine pendant le passage des crues, a été exaucé. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**BÉTON : 5 500 m<sup>3</sup>**

**ACIER BÉTON ARMÉ : 650 t**

**LONGUEUR DE TORONS D'ANCRAGE : 440 km**

**COÛT DES TRAVAUX : 36 M€**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Department of Water and Sanitation - South Africa

**EXPLOITANTS :** Department of Water and Sanitation - Umgeni Water,

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Ingerop South Africa

**CONTRACTOR :** Group Five Construction Ltd

**SUBCONTRACTOR (ANCRAGES) :** SRG Pty Ltd

## ABSTRACT

### PKW AND EXCEPTIONAL TIE ANCHORS: DOUBLE SUCCESS FOR THE HAZELMERE DAM (SOUTH AFRICA)

DUANE BOYSE, INGEROP SOUTH AFRICA - ADAM BOTHA, INGEROP INTERNATIONAL CONSULTANTS - CLAUDE BESSIERE, GROUPE INGÉROP

**Hazelmere Dam, built in 1975-76 in Kwazulu-Natal (South Africa), was designed for its storage capacity to be eventually more than doubled, by raising the reservoir level by 7 metres, without changing its peak level. In 2012, when this raised capacity was needed, based on recent projects the designers were able to allow for changes in the input data and provide exceptional flood risk control by developing a Piano Key Weir 10 metres high (the highest of the 30 PKWs existing in 2017), and satisfactory stability conditions by optimising the number of prestressed tie anchors required after an in-situ test campaign. □**

### PKW Y TIRANTES EXCEPCIONALES: DOBLE O NADA PARA LA PRESA DE HAZELMERE (SUDÁFRICA)

DUANE BOYSE, INGEROP SOUTH AFRICA - ADAM BOTHA, INGEROP INTERNATIONAL CONSULTANTS - CLAUDE BESSIERE, GROUPE INGÉROP

**Construida en 1975-1976 en Kwazulu-Natal (Sudáfrica), la presa de Hazelmere fue diseñada para que su capacidad de almacenamiento pudiera un día duplicarse con creces, aumentando 7 m el nivel del dique sin cambiar el nivel de su cresta. En 2012, cuando se hizo necesaria la ampliación, apoyándose en realizaciones recientes los diseñadores pudieron tener en cuenta la evolución de los datos de entrada, garantizando la gestión de los riesgos de crecida excepcional mediante la construcción de un Piano Key Weir de 10 m de altura (el mayor de los 30 PKW existentes en 2017) y unas condiciones de estabilidad satisfactorias, optimizando el número de anclajes pretensados necesarios tras una campaña de pruebas in-situ. □**





1  
© ARTELIA

# GÉLITRA : UN OUTIL DE GESTION POUR LES LIVRAISONS DE CHANTIERS EN SITE URBAIN DENSE

AUTEURS : LAURENT VIGNEAU, DIRECTEUR INNOVATION, EXPERT TERRITOIRES ET URBANISME, MOBILITÉS ET ENVIRONNEMENT, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT - JEAN LOUIS CHOPIN, DIRECTEUR ASSISTANCE PILOTAGE DE PROJETS, ARTELIA VILLE ET TRANSPORT

**PLUS PERSONNE NE TOLÈRE L'APPROVISIONNEMENT DES CHANTIERS URBAINS ET LES NUISANCES ASSOCIÉES. SE PROFILENT POUTANT LES TRÈS GRANDS CHANTIERS FRANCILIENS DU MÉTRO EXPRESS ET DES MULTIPLES OPÉRATIONS D'AMÉNAGEMENT CONNEXES, SUR PLUSIEURS DÉCENNIES. GÉLITRA EST UNE SOLUTION NUMÉRIQUE ET SPATIALE INVENTÉE PAR ARTELIA POUR PLANIFIER ET FLUIDIFIER LES LIVRAISONS DES CHANTIERS. GÉLITRA PERMET D'ÉVITER LE STATIONNEMENT DES ENJINS DES CHANTIERS SUR L'ESPACE PUBLIC TOUT EN MAÎTRISANT LES FLUX DE PLUSIEURS CHANTIERS CONCOMITANTS AVANT, PENDANT ET APRÈS LES LIVRAISONS.**

## À QUOI FAUT-IL S'ATTENDRE ?

L'approvisionnement des chantiers en milieu urbain dense est toujours difficile, même pour des travaux modestes ou ponctuels, mais qu'en est-il des énormes chantiers prévus en Île-de-France ? Les estimations portent par exemple à plus de 400 poids-lourds l'approvisionnement total journalier de la Ligne 15 Sud du métro express dans sa totalité et au plus fort du chantier. Et pourtant, cela reste modeste au regard des besoins d'approvisionnement des opérations urbaines concomitantes qui peuvent doubler ou tripler ce volume (figure 2).

Un regard doit également être posé sur la nature des tissus urbains qui vont accueillir ces flux : 26 % des surfaces au sol dans Paris intramuros sont des espaces publics ou des voiries, mais ce taux tombe à 15 % en proche couronne.

Les capacités y sont faibles et les espaces à mobiliser pour absorber des flux supplémentaires y sont rares. Au-delà des exceptionnels chantiers franciliens à venir, l'organisation des chantiers en milieu urbain suscite souvent l'incompréhension des riverains et des usagers. Elle perturbe les rares marges de capacité d'un espace public déjà très sollicité.

**1- Les Halles à Paris, un chantier titanesque à l'origine de la création de Gélitra.**

**1- Les Halles in Paris, a gigantic project which was the basis for Gélitra's creation.**

Le sujet n'est pas nouveau mais, à l'heure du numérique, de l'information en temps réel et de la géolocalisation, il est temps de le considérer différemment (figure 3).

## GÉLITRA - UNE ORGANISATION NUMÉRIQUE ET SPATIALE DES CHANTIERS

Gélitra (GEstion - Livraison - TRAfic) a été développée par Artelia pour optimiser le pilotage des grands chantiers urbains.

L'outil et son exploitation résultent de l'accompagnement au quotidien de multiples chantiers de toute nature et de la compréhension de leurs organisations humaines et logistiques.

De multiples interviews, expérimentations et prototypes ont permis de converger vers une agilité numérique qui reprend point par point les grandes étapes de la vie du chantier (figure 4).

## UNE ESTIMATION DES VOLUMES JOURNALIERS DE POIDS-LOURDS liés au métro express (en orange) et aux ZAC d'aménagement (en bleu) sur un territoire du sud parisien



2- Une estimation des volumes journaliers de poids-lourds liés au métro express (en orange) et aux ZAC d'aménagement (en bleu) sur un territoire du sud parisien.  
3- Un chantier qui paraissait si simple !

2- An estimate of the daily volumes of heavy vehicles related to the express metro (in orange) and to "ZAC" mixed development zones (in blue) in an area in southern Paris.  
3- A project which seemed so simple!

© ARTELIA  
2

### CONSTRUIRE UN PLANNING COLLABORATIF ET ORGANISER SA VALIDATION

Le premier apport de Gélitra consiste en un planning collaboratif unique de gestion du chantier. Bâti pour permettre à chaque acteur de la chaîne d'approvisionnement de soumettre ses désirs

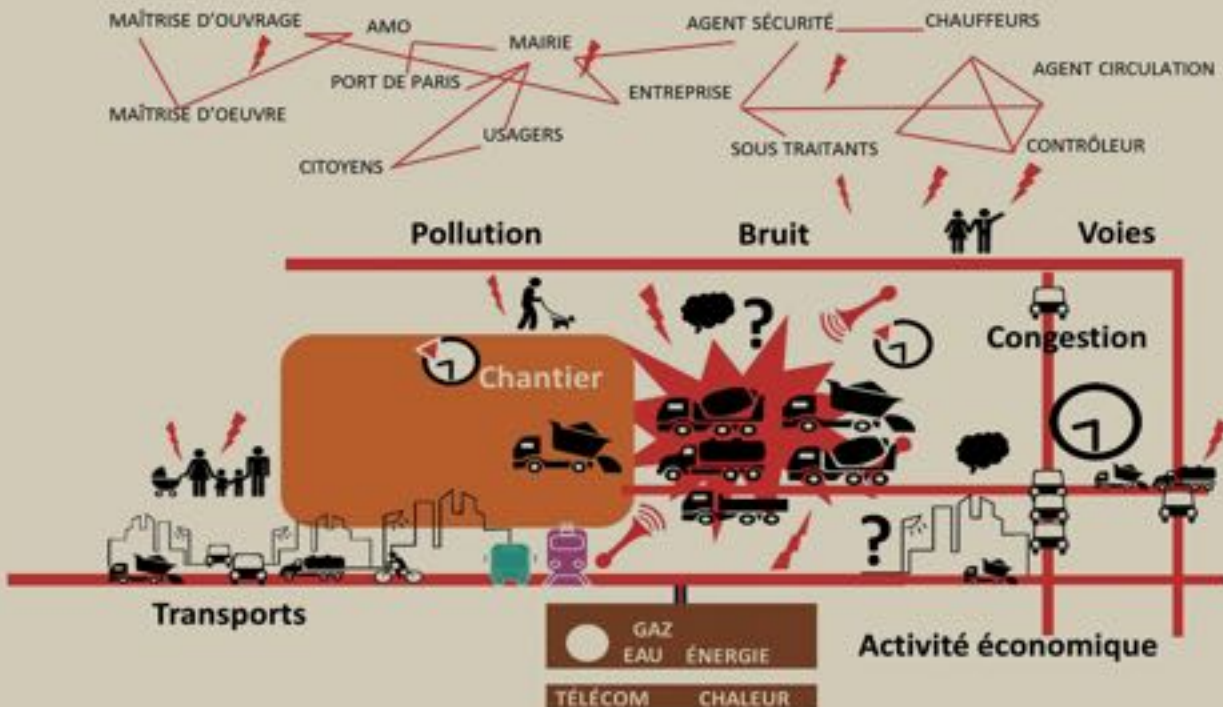
et avis de livraisons, il organise les validations successives et informe tout le monde des évolutions de planifications en temps réel.

Ainsi, les chefs de cour enregistrent sur la plateforme leurs intentions de flux et de livraisons, par natures ou types de camions. L'entreprise ou le livreur

renseignent également à tout moment les livraisons qu'ils ont enregistrées et les horaires qui leur semblent les plus adéquats. Se bâtit ainsi un planning collaboratif des flux attendus sur le chantier. Chaque intervenant voit les réservations horaires réalisées par d'autres intervenants pour limiter autant

que possible les périodes de pointes. Régulièrement, une lecture critique des flux attendus est faite par le chef de chantier désigné pour valider les approvisionnements du chantier. Gélitra se charge alors automatiquement d'informer chaque auteur initial des modifications apportées au planning. ▷

## UN CHANTIER QUI PARAÎSSAIT SI SIMPLE !



© ARTELIA  
3



Ce partage de la planification des flux liés au chantier par tous les acteurs ayant reçu un droit de regard, de proposition ou de validation améliore beaucoup l'approvisionnement du chantier. Chacun est conscient de sa place dans un contexte global et de l'importance de sa ponctualité. Chacun comprend les priorités et les préoccupations qui ont pu conduire le chef de chantier à proposer ses propres horaires. Enfin, chacun reçoit automatiquement par mail la validation finale qui récapitule l'entrée du chantier, le plan d'accès, les conditions de livraison, voire le règlement...

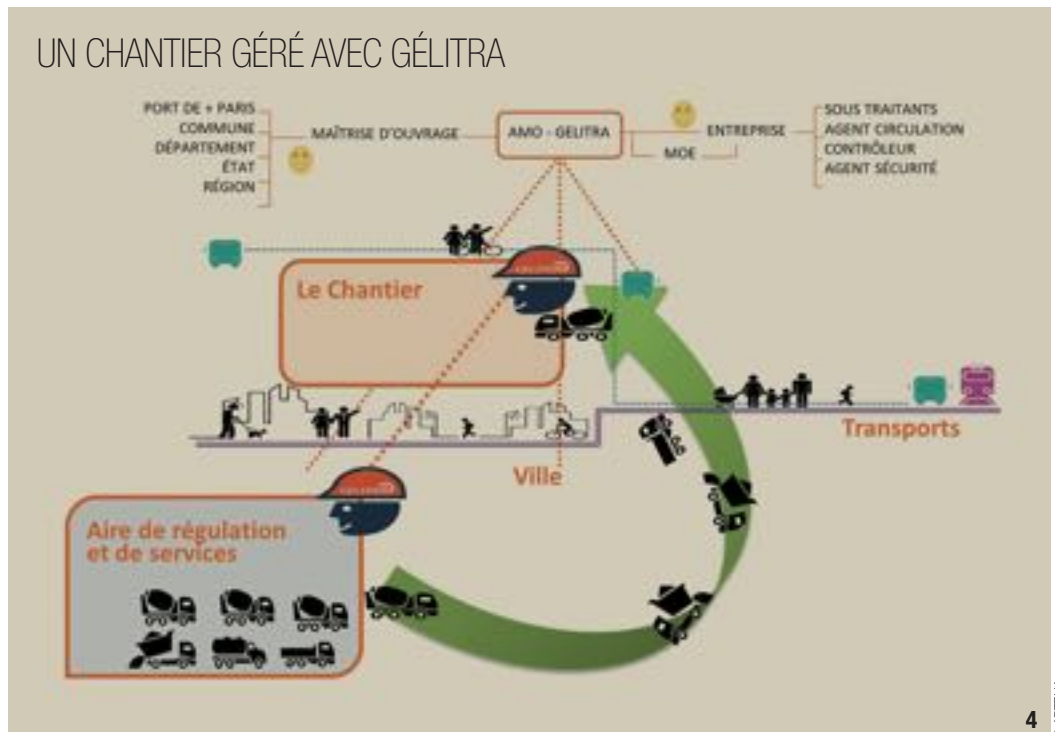
La livraison peut ainsi se faire dans les meilleures conditions de planification, de compréhension et d'informations mutuelles (figure 5).

### LE JOUR DE LA LIVRAISON, UN BALAI DE FLUX FINEMENT RODÉ

Chaque jour, les agents de circulation disposent sous forme de listes de l'ensemble des flux attendus à l'entrée du chantier. Présentés sur tablettes de chantier, ils comportent toutes les informations nécessaires à l'accueil des poids-lourds de façon très visuelle : nature du poids-lourds, nature de la livraison, zone du chantier à desservir, heure prévisionnelle d'arrivée.

À chaque accueil de livraison, l'agent clique sur le camion considéré et la plateforme enregistre automatiquement l'heure d'arrivée effective de la livraison. Il en sera de même à la sortie du chantier.

Le fichier planning prévisionnel sert ainsi de support au pointage de ce



qui se passe réellement sur le terrain. L'usage temps réel des éléments de planification optimise l'accueil des livraisons, la gestion des priorités ou des imprévus, et l'orientation des flux à l'intérieur du chantier.

La planification relayée par l'accueil des livraisons a également un objectif majeur : éviter le stationnement des poids-lourds en dehors de l'enceinte du chantier ; il s'agit là, en effet, d'une nuisance sur les riverains et sur la vie urbaine jugée inacceptable aujourd'hui (figure 6).

#### 4- Un chantier géré avec Gélitra.

5- La planning : chacun participe, un seul valide, chacun est informé.

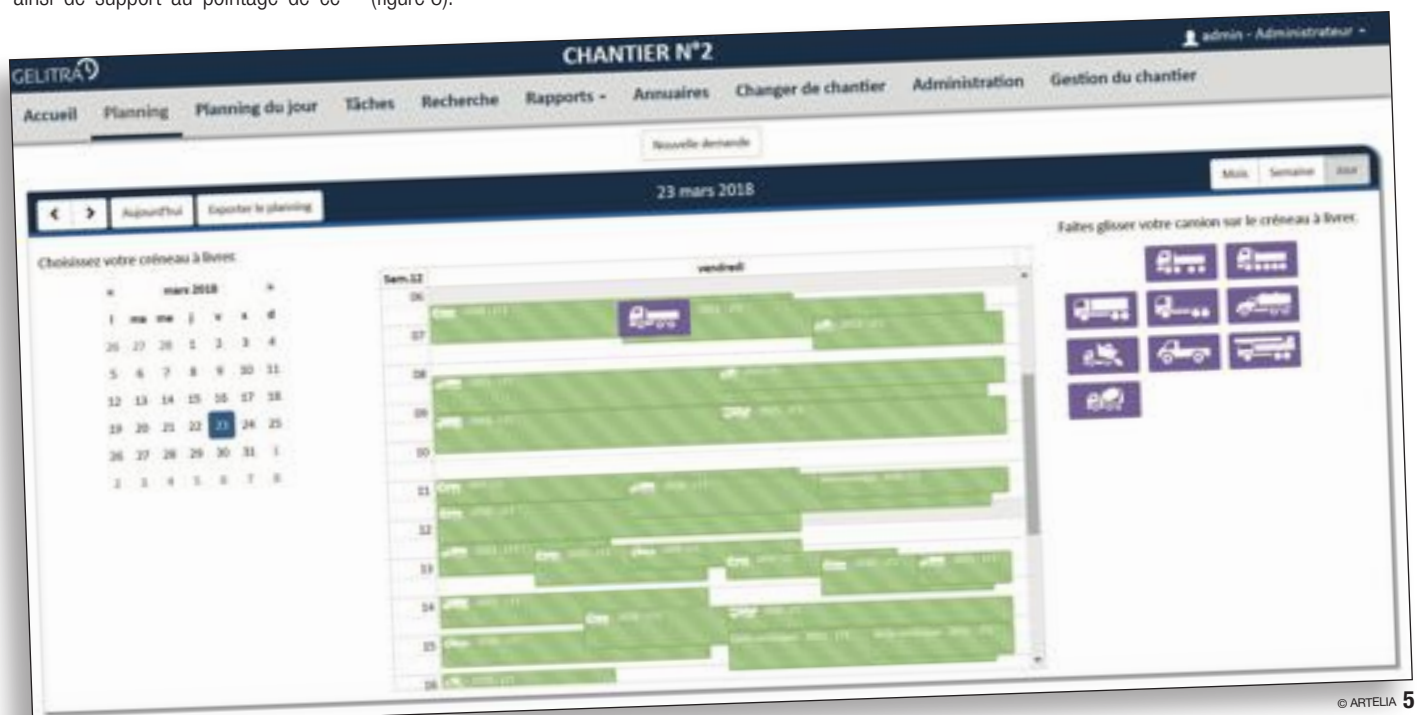
#### 4- A project managed with Gélitra.

5- Scheduling: everyone takes part, a single actor validates, and everyone is informed.

#### LA POSSIBILITÉ DE L'AIRE DÉPORTÉE

Sur certains chantiers très contraints, il n'y a pas de possibilités de stockage des livraisons à l'entrée du chantier et le risque de stationnement sur voirie est trop important vis-à-vis de la sensibilité des usages urbains et/ou des engagements du maître d'ouvrage pour limiter les nuisances.

Est alors organisée une aire déportée où sont accueillis tous les flux avant d'être orientés vers le chantier.



6- L'agent de circulation renseigne en temps réel tous les événements.

7- La prise en charge des chauffeurs pour le dernier kilomètre est très appréciée.

6- The traffic officer enters all events in real time.

7- Driver management for the last mile is greatly appreciated.

## GÉLITRA EN QUELQUES MOTS

- Prévoir les flux des chantiers et anticiper leurs impacts.
- Mutualiser plusieurs chantiers pour raisonner à l'échelle du territoire.
- Mettre en place une éventuelle zone déportée d'accueil des camions.
- Gérer et archiver toutes les livraisons via une plateforme collaborative.
- Réduire les temps d'attente des camions, fluidifier le trafic.
- Informer en temps réel ou différé de tout ce qui se passe aux abords du chantier.
- Organiser la construction mutualisée des plannings de livraisons.
- Traduire automatiquement les plannings en bordereaux et coordonnées GPS.
- Prendre en charge les camions avec les agents de circulation, améliorer les conditions de travail des chauffeurs.
- Respecter ses engagements de ponctualité et capitaliser.



6 © ARTELIA

Dans cette configuration, Gélitra est un puissant facteur d'organisation du dernier kilomètre : deux agents de circulations, l'un sur l'aire déportée et l'autre à l'entrée du chantier, disposent du même planning numérique et Gélitra permet, par simple clic de l'un ou de l'autre de tracer pour chaque livraison l'heure attendue sur l'aire déportée, l'heure d'arrivée, l'heure de départ de l'aire déportée, l'heure d'arrivée au chantier, l'heure de départ de chantier.

Ainsi l'on pourra en temps réel voir combien de poids-lourds se trouvent entre l'aire déportée et le chantier, combien de temps ils mettent pour faire le dernier kilomètre, quel est le « remplissage » du chantier.

L'ensemble autorise des actions d'ajustements permanentes pour optimiser le dernier kilomètre et éviter tout stationnement sur voirie à l'entrée du chantier (figure 7).

### APRÈS LA LIVRAISON, EXPERTISES ET ENSEIGNEMENTS

La plateforme enregistre automatiquement tous les événements de chaque livraison, ce qui permet de disposer des chronogrammes de toutes les livraisons à postériori.

L'exploitation de ces données a plusieurs objectifs : retracer un événement précis en cas de plainte riveraine ou de protestation, juger de la régularité des livraisons, doser les capacités d'accueil et d'absorption des emprises du chantier, consolider le retour d'expérience et l'optimisation globale du chantier, archiver sur de longues périodes les durées et la nature des livraisons pour mieux organiser les chantiers futurs (figure 8).

### LA PREUVE PAR L'EXEMPLE : LE CHANTIER DES HALLES À PARIS

Gélitra a fait ses preuves dans sa version initiale pour la gestion du chantier des Halles à Paris. La demande du maître d'ouvrage à Artelia était alors d'imaginer une solution permettant de tenir un engagement majeur : aucun stationnement des engins hors de l'enceinte du chantier.

Le chantier des Halles est d'une rare complexité.

Les volumes sont énormes, tous les corps d'état sont représentés et l'exploitation de la plus grande gare souterraine d'Europe n'a jamais cessé. En 2010, l'approvisionnement du chantier sans nuisances par l'accès unique de la rue du Pont-Neuf, voie historique très commerçante, semble impossible. ▷



7 © ARTELIA



Gélitra a dès lors été imaginée et développée pour disposer avant tout d'une méthode collaborative d'élaboration des livraisons du chantier et d'une information exhaustive et exacte à tout moment entre tous les acteurs. La seconde décision a été de translater l'accueil du chantier sur une aire déportée située le long du Louvre, avec dédoublement des agents de circulation et gestion optimisée du dernier kilomètre.

La gestion des approvisionnements se faisait par une zone de stockage déportée car les matériels et matériaux, équipements techniques arrivaient de l'Europe entière, donc il était illusoire qu'ils arrivent le jour J, à l'heure H pour les besoins des chantiers.

En conséquence, il a été prévu une base déportée en périphérie de Paris où les matériels les plus encombrants pourraient être stockés et acheminés selon les besoins des différents OPC. Nous avions également imaginé et réalisé la gestion d'une zone d'attente déportée, pour gérer quatre types de besoins identifiés selon les phases d'avancement des chantiers (figures 9 et 10) :

- La gestion des camions nécessaires à l'évacuation des gravats en phase démolition ;
- Les livraisons en flux tendu, type béton, acier, matériels et matériaux divers, nécessaires à l'avancement des travaux au quotidien ;
- Les livraisons de matériels depuis la zone de stockage déportée (escalators, CTA, ascenseurs, produits verriers, etc.) ;
- La nécessité d'une dépose minute pour les livraisons des petits matériels et matériaux pour subvenir aux demandes imprévues.

Gélitra permet l'extraction de deux plannings :

- Le planning des livraisons par projet pour analyse et prise de décision ;
- Le planning de l'agent de trafic pour le contrôle des camions en zone déportée puis en zone livraison.

La zone déportée pouvant accueillir 10 camions, la fréquence des rotations était de l'ordre de 20 minutes. Près de 30 000 flux de livraison ont ainsi été gérés sur plusieurs années à travers la version initiale de Gélitra. Les enseignements sont nombreux : la quasi disparition des nuisances en dehors de l'enceinte du chantier, l'intérêt qu'on trouve les entreprises à la « délégation » du dernier kilomètre et à l'information des riverains, le confort qu'on trouve les chauffeurs à l'accueil dans l'aire déportée apaisée et à l'orientation



vers le chantier lorsque la certitude d'y être accueilli est établie.

L'expertise de tous les flux a permis également de mieux comprendre les temps de chargement et de déchargement, les marges d'optimisation et les rythmes de certains fournisseurs tout en gérant mieux les priorités des convois exceptionnels. Le tout en évitant des centaines de milliers d'impressions papier du fait que Gélitra distribue en permanence les décisions sous format numériques, personnalisés pour chaque type d'acteur.

Le maître d'ouvrage a apprécié la possibilité de prévoir les événements

**8- Gélitra organise et archive tous les événements du chantier.**

**9- Zone de stockage déportée.**

**8- Gélitra organise et archive all worksite events.**

**9- Remote storage area.**

importants, de maîtriser l'organisation spatiale du chantier et de ses accès, de limiter fortement les nuisances et d'avoir a posteriori des analyses très précises de tous les événements, en cas de plainte riveraine par exemple. Une conclusion importante de cette aventure fut l'affirmation du côté profondément humain des chantiers en tant que prérequis de toute considération : un chantier n'est jamais totalement déterminé. Il doit son succès à une intelligence intrinsèque et collective à gérer l'imprévu, à pallier les aléas, à s'adapter à tout. Gélitra ne peut pas se substituer au génie humain des





chantiers. Elle n'apporte qu'une facilité supplémentaire et a été conçue pour ne pas impacter le chantier en cas de dysfonctionnement ; il est toujours possible lors d'un aléa de chantier de revenir momentanément à un calage des actions par talkie-walkie ou par téléphone. Ce besoin de souplesse a dicté tous les développements ultérieurs de Gélitra jusqu'à aujourd'hui (figure 1).

### L'EXPÉRIMENTATION DU GRAND PARIS EXPRESS

En 2016, Gélitra a été retenue par la Société du Grand Paris en tant que lauréate du défi des mobilités. S'ouvrirait alors une année d'intenses développements destinés à réécrire dans une nouvelle ergonomie la plateforme et à considérer les enjeux non plus d'un chantier, mais d'un territoire de chantiers.

La plateforme a d'abord gagné en ergonomie, avec aujourd'hui une simplicité d'utilisation très visuelle et conviviale. En parallèle, de nouvelles complexités dans l'organisation des acteurs sont apparues, comme la mutualisation d'une aire déportée par plusieurs maîtres d'ouvrages, ou bien l'alimentation de plusieurs chantiers depuis une même aire déportée, ou bien encore l'approvisionnement des chantiers qui ont plusieurs entrées.

Le travail avec l'ensemble des acteurs du Grand Paris a fait glisser la plateforme Gélitra vers une proposition globale de services à assembler à sa guise

**10- Zone de stockage complémentaire.**

**11- Le tableau de bord territorial de tous les chantiers.**

**10- Additional storage area.**

**11- The regional management dashboard of all projects.**

selon chaque chantier ou territoire. Ainsi trouve-t-on dans Gélitra des propositions d'expertises et d'études comme l'évaluation des flux de poids-lourds, le diagnostic de la sensibilité des sites à accueillir un chantier, le conseil pour la recherche des aires déportées, le traitement des dossiers réglementaires associés, etc.

C'est aujourd'hui un bouquet de services à la carte que propose Gélitra pour bien organiser ses chantiers, relayé par la mise en place de la plateforme de gestion du chantier lorsque tous les prérequis sont consolidés.



## LES DÉVELOPPEMENTS ACTUELS

La concertation avec une multitude d'acteurs des chantiers consolide aujourd'hui la fabrication d'une plateforme globale de gestion des chantiers qui contient déjà les principaux modules d'optimisation évoqués ci-dessus.

Gélitra est conçue pour accueillir de nouveaux services au fur et à mesure des développements. Parmi ces derniers, deux ont émergé de la rencontre avec les acteurs des chantiers : l'assistance à l'organisation des occupations des voiries et la géolocalisation.

Gélitra proposera rapidement un outil d'assistance à l'organisation des occupations des voiries, à destination des collectivités : supports réglementaires, exemples de saisine du conseil municipal, du préfet, cartographie des espaces à mobiliser, plans de jalonnement, etc.

Côté géolocalisation, la question d'un appariement de la gestion des flux par Gélitra avec des données géolocalisées se pose. Plutôt que de dessiner une solution figée qui réponde à un objectif, a été dressée la cartographie des désirs selon les acteurs pour constater que ces derniers sont très différents selon les cas : respect des itinéraires, suivi de la ponctualité, report des livraisons selon, notamment, la circulation et le suivi des chauffeurs, des camions ou des matériaux.

Gélitra propose aujourd'hui une expertise issue de la rencontre de la vingtaine d'opérateurs qui offre en France des solutions de géolocalisation.

Le constat est que toutes les technologies sont développées et fonctionnent très bien, chaque opérateur étant positionné sur un segment d'utilité spécifique. Gélitra se positionne en conséquence en tant qu'ensemblier de ces solutions en fonction des besoins de chaque chantier ou territoire et des souhaits audités chez les futurs utilisateurs. L'expertise porte ici sur les technologies, mais aussi et surtout sur leurs coûts, la propriété des données, la protection des données personnelles, la facilité de mise en œuvre et globalement la façon de contractualiser tout cela (figure 11).

## LE RETOUR DES UTILISATEURS

Gélitra adresse différemment chaque acteur des chantiers et, pour chacun d'entre eux, les services peuvent être adaptés selon les natures et les besoins des chantiers. Plusieurs expertises courtes et peu onéreuses sont proposées en préambule à la mise en œuvre de la plateforme numérique.





12

© ARTELIA



13

© ARTELIA

Ces dernières intéressent surtout les maîtres d'ouvrages et les collectivités et permettent d'estimer les volumes de flux prévisionnels, les nuisances auxquelles il faut s'attendre, les possibilités d'organisations et les feuilles de route associées (figure 12).

Les entreprises, également, trouveront intérêt à bénéficier de la banque de données des chantiers antérieurs et des retours d'expérience pour optimiser leurs chantiers à venir.

Une fois que la plateforme est mise en place, plusieurs services sont proposés à la carte à destination des différents acteurs. Ils sont personnalisés et budgétés en fonction des besoins exprimés. Pour une collectivité, le financement de Gélitra sera motivé par la recherche d'une gestion mutualisée des aires déportées, une maîtrise des flux prévus et réels. Un abonnement à l'information temps réel des flux et à un reportage des événements est souvent apprécié, avec ou sans ouverture au grand public. La collectivité peut financer le dispositif en échange de la contrainte faite à tous les acteurs des chantiers de l'utiliser. D'autres applications peuvent découler de l'archivage précis des flux comme

les conditions de remises en état des espaces publics après les chantiers ou la planification des déplacements successifs de plusieurs chantiers et des aires déportées sur le territoire, associés à la qualification des emplois inhérents au dispositif.

Pour le maître d'ouvrage, la maîtrise des flux de chantier est fondamentale pour garantir la tenue de ses engagements et gérer finement tous les impacts de son chantier.

Pour les entreprises, les usages de Gélitra sont sources de gains économiques

**12- Éviter à tout prix les nuisances du chantier.**

**13- Refaire la ville sur la ville en toute quiétude, avec Gélitra.**

**12- Preventing worksite nuisances at all costs.**

**13- Trouble-free urban renovation with Gélitra.**

importants par l'optimisation de l'ensemble du chantier et la robustesse des vecteurs de communications entre les acteurs. L'investissement pour disposer de l'outil et des formations nécessaires est très faible par rapport aux économies réalisées. Plusieurs services viennent compléter ces gains comme la délégation du dernier kilomètre ou la recherche d'optimisations des chantiers par l'expertise régulière des flux et des horaires. Gélitra peut également s'autofinancer si l'entreprise décide de faire participer financièrement chaque livraison, voire de faire varier cette participation en fonction des ponctualités... Pour les livreurs et prestataires, la délégation de la prise en charge des chauffeurs à l'approche des chantiers et la gestion de l'attente dans des zones apaisées comportant des services est une source de confort très importante. Finalement, les gains de Gélitra sont à partager entre tous les acteurs. Artelia agence les bénéficiaires et les financements de la solution différemment selon les configurations et les chantiers, à partir d'un audit des besoins et des désirs de chacun (figure 13). Voir le site web de Gélitra : [www.gelitra.com](http://www.gelitra.com) □

## LES AVANTAGES DE GÉLITRA

- Anticipation, organisation, optimisation des livraisons du chantier.
- Communication temps réel entre tous les acteurs du chantier.
- Suivi pas à pas des livraisons et archivage de tous les mouvements.
- Acceptabilité du chantier par les riverains.
- Disparition de la gêne visuelle et spatiale des engins à l'arrêt sur la voirie.
- Baisse de la pollution de l'air et des nuisances sonores.
- Absence de manœuvre injustifiée.
- Facilitation de la maintenance des réseaux communaux et régionaux pendant le chantier.

### ABSTRACT

#### GÉLITRA: A MANAGEMENT TOOL FOR SITE SUPPLIES IN DENSE URBAN LOCATIONS

LAURENT VIGNEAU, ARTELIA - JEAN LOUIS CHOPIN, ARTELIA

**Gélitra is the innovative digital and spatial solution for site supplies.**

*It was designed and developed by Artelia for the Halles worksite in the heart of Paris, then improved in the context of the "mobility challenge" for Société du Grand Paris. It is an ergonomic digital tool which organises collaboration of all the actors to plan supplies for one or more worksites. Gélitra then automates all follow-up, archiving and information concerning everything that happens in the site surroundings. All the worksite actors find their own specific benefits from Gélitra: nuisance abatement, worksite economics, driver comfort, cooperation and communication, last mile management, etc. □*

#### GELITRA: UNA HERRAMIENTA DE GESTIÓN PARA LAS ENTREGAS DE OBRA EN ENTORNO URBANO DENSO

LAURENT VIGNEAU, ARTELIA - JEAN LOUIS CHOPIN, ARTELIA

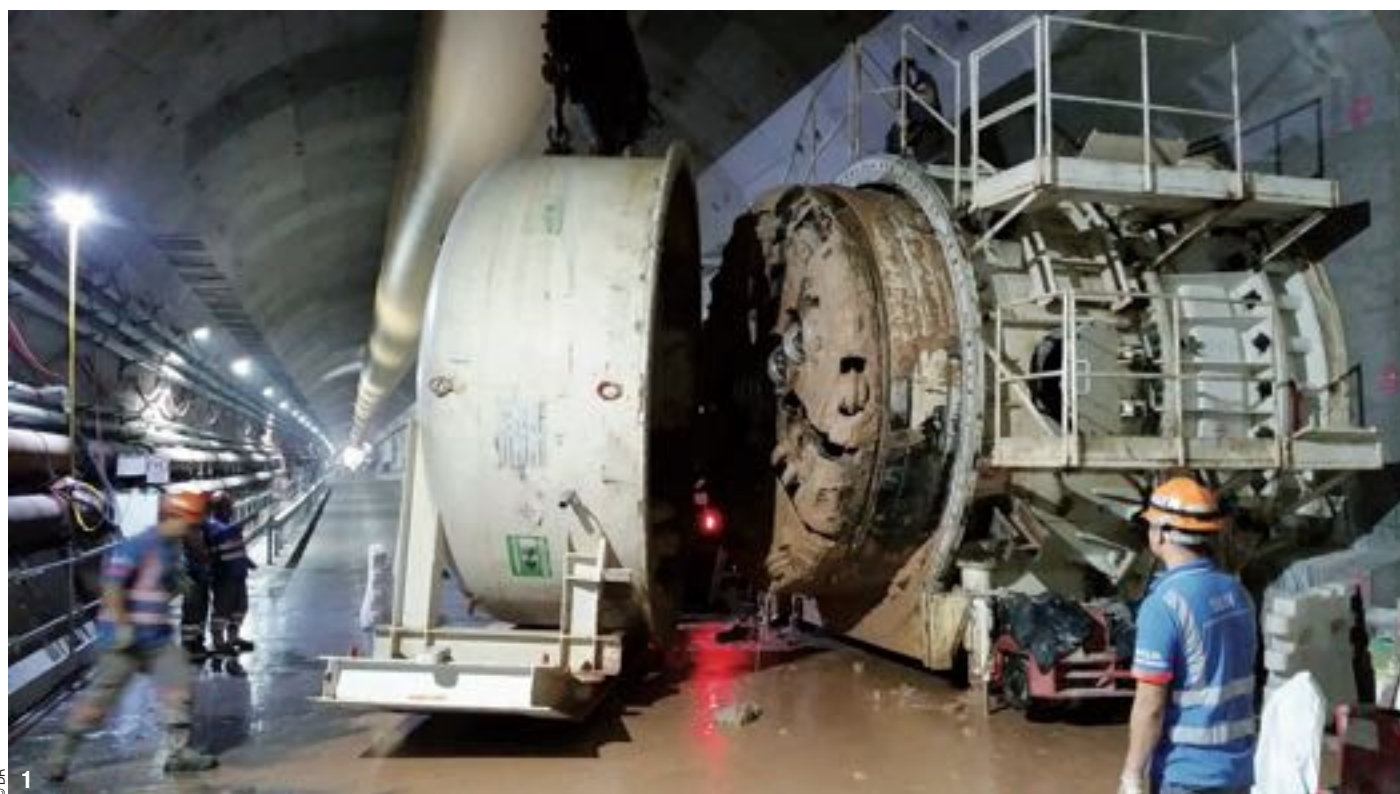
**Gelitra es una innovadora solución digital y espacial para las entregas de obra.**

*Fue diseñada y desarrollada por Artelia para la obra de Les Halles, en el corazón de París, y seguidamente mejorada en el marco del "Desafío Movilidad" del ente gestor de la aglomeración de París, Société du Grand Paris. Se trata de una herramienta digital y ergonómica que organiza la colaboración de todos los actores para planificar las entregas de una o varias obras. A continuación, Gelitra automatiza el conjunto de seguimientos, archivos e informaciones sobre todo lo que sucede en proximidad de la obra. Gelitra trata todos los aspectos que pueden interesar a los distintos actores del proyecto: reducción de molestias, economía de la obra, confort de los conductores, concertación y comunicación, gestión del último tramo, etc. □*

# CONSTRUCTION MÉCANISÉE DE RAMEAUX INTER-TUBES

AUTEURS : ESTELLE CAGNAT, RESPONSABLE MÉTHODES, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - MORGAN OLERON, CONSTRUCTION MANAGER, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - THIBAUT LOCKHART, COORDINATEUR TECHNIQUE, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

UNE TECHNIQUE INNOVANTE A ÉTÉ DÉVELOPPÉE POUR RÉALISER DE MANIÈRE INDUSTRIELLE UN GRAND NOMBRE DE RAMEAUX INTER-TUBES EN TERRAIN MEUBLE ET SOUS FORTE CHARGE D'EAU. LE RAMEAU EST FONCÉ D'UN TUNNEL À L'AUTRE PAR UN MICRO-TUNNELIER QUI DÉBOUCHE DANS UNE CLOCHE EN ACIER, MOYENNANT LA CONCEPTION D'UN TYMPAN BÉTON POLYVALENT ET DE VOUSOIRS SPÉCIAUX HYBRIDES.



© DR 1

## INTRODUCTION

### LE PROJET DU TUNNEL TUEN MUN CHEK LAP KOK

Le tunnel Tuen Mun - Chek Lap Kok, à Hong Kong, fournit une nouvelle connexion autoroutière entre les Nouveaux Territoires du Nord-Ouest et l'île de Lantau, afin d'anticiper un accroissement du trafic et de relier entre eux le poste frontalier de l'aéroport, la future jonction *Tuen Mun Western Bypass* et la route existante *Lung Mun* (figure 2). Le contrat comprend la conception et la réalisation de la digue Nord, une réclamation de 16 ha adjacente à la ville de Tuen Mun, deux tunnels sous-marins de 4,5 km et 56 rameaux d'évacuation. Les tunnels principaux ont été forés

1- Ouverture de la cloche dans le tunnel d'arrivée.

1- Opening the bell in the arrival tunnel.

par des tunneliers à pression de boue, dont l'un détient le record du monde de diamètre avec 17,56 m. La partie sous-marine, d'un diamètre intérieur de 12,40 m, abrite la chaussée autoroutière à deux voies ainsi que des espaces dédiés à la ventilation et à l'exploitation (figure 2).

## LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le profil géotechnique type consiste en des dépôts marins très mous en surface (*marine deposits*), puis d'alluvions sableux ou limoneux/argileux, sous lesquels on rencontre du granite plus ou moins altéré avant le substratum rocheux granitique. Sur le quart Sud de l'alignement, des métasédiments remplacent le granite, avec des propriétés mécaniques similaires. Les rampes d'accès Nord et Sud sont réalisées dans des remblais artificiels récents (figure 3). Ces formations peuvent être caractérisées par des paramètres géotechniques typiques (tableau 1). La pression hydrostatique maximale autour des rameaux les plus profonds

s'élève à 5,5 bars, dans les horizons perméables.

## LES RAMEAUX DE CONNEXION

L'évacuation d'urgence des passagers est assurée par des rameaux reliant les deux tunnels tous les 100 m.

La longueur typique d'un rameau est d'environ 14 m, et on avait cherché dès les premières phases de la conception à en standardiser le diamètre et le niveau vertical relatif par rapport aux tunnels principaux (figure 4).

Le gabarit piéton est de 2,1 m en hauteur x 2 m en largeur, ce qui donne un diamètre intérieur théorique de 2,90 m, soit 3,0 m considéré après ajout des tolérances de réalisation (figure 5). ▷



## POURQUOI UNE SOLUTION MÉCANISÉE ?

La conception de base impliquait le creusement des rameaux sous congélation à la saumure, puis excavation traditionnelle (minage).

Cette approche s'est rapidement révélée sans issue, pour les raisons principales suivantes :

- Les tests de laboratoire menés sur les échantillons de sols congelés ont donné des résistances mécaniques tellement basses que l'épaisseur de l'anneau de glace requis autour de l'excavation (3 m hors tolérances) était irréalisable en pratique.
- Pour des raisons de sécurité, la congélation à l'azote liquide en tunnel (espace confiné) était interdite, ce qui laissait la saumure comme seule option. De manière conjointe, la durée de mise en froid, donc de construction, s'était allongée, ainsi que la sensibilité aux conditions locales (géologie, fonte imprévue etc.), ce qui finissait par impacter le calendrier général du projet.

D'où la décision de développer une solution mécanisée aussi industrialisée que possible, afin de réaliser les rameaux dans toutes les conditions, avec un cycle de production standard et peu sujet à perturbation (figure 6). Le concept général de la solution, détaillé dans la suite de cet article, est le suivant :

- Réalisation d'un tympan en béton armé, assurant des fonctions temporaire et permanente ;
- Dans le tunnel de départ, installation de l'équipement de fonçage et du bâti ;
- Dans le tunnel d'arrivée, installation de la cloche métallique de récupération ;
- Excavation par fonçage au micro-tunnelier (*pipe-jacking*), avec les tronçons de tubes en béton armé constituant directement le revêtement final.

## CONCEPTION

### FIL CONDUCTEUR DE LA CONCEPTION

La conception des rameaux souterrains est un sujet bien connu, avec ses questions récurrentes :

- 1- Comment stabiliser le tunnel principal avant ouverture ;
- 2- Comment réaliser l'ouverture dans le béton des voussoirs ;
- 3- Comment creuser le rameau ;
- 4- Comment déboucher dans le tunnel opposé (ce qui serait aussi valable dans un puits) ;

## LOCALISATION DU PROJET TMCLKL



2a

2- Localisation du projet TMCLKL (2a) - Portail Nord (2b).

2- Location of the TMCLKL project (2a) - North portal (2b).



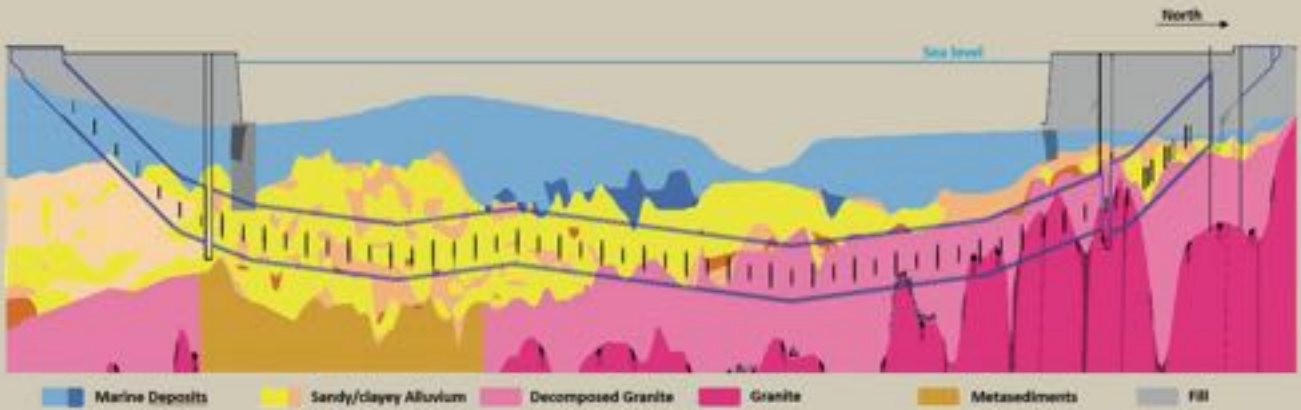
2b

- 5- Comment garantir l'étanchéité de l'ouvrage fini, en particulier aux points de jonction ;
- 6- Comment réaliser le revêtement définitif du rameau ;

TABLEAU 1 : PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES

Couche géologique	Poids volumique $kN/m^3$	Module d'Young $MPa$	Angle de frottement $^\circ$	Cohésion non drainée $kPa$
Remblai / Fill	19	20	30	0
Marine deposits	14,5	2	0	5
Alluvium clay	19	8	0	35
Alluvium sand	19	12	34	0
Completely Decomposed Granite	20	70	36	0
Granite	23	>500	UCS 30 to 150 MPa	

## PROFIL GÉOLOGIQUE LE LONG DES TUNNELS



© DR 3

3- Profil géologique le long des tunnels.

4- Configuration typique d'un rameau.

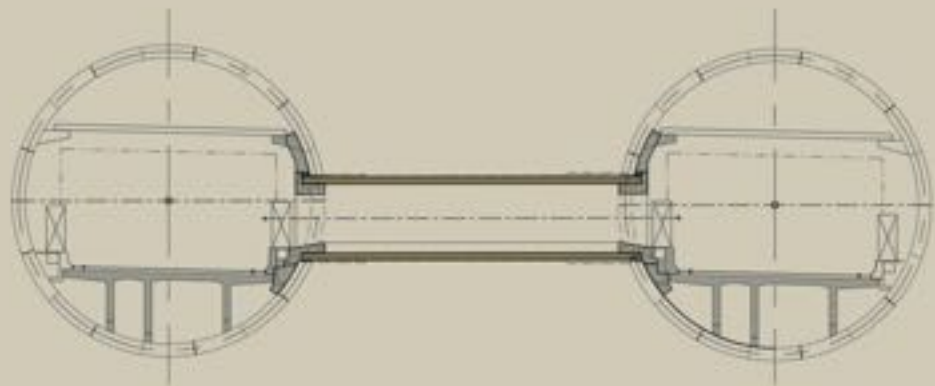
5- Coupe d'un rameau.

3- Longitudinal geological profile of the tunnels.

4- Typical configuration of a connecting gallery.

5- Cross section of a connecting gallery.

## CONFIGURATION TYPIQUE D'UN RAMEAU



© DR 4

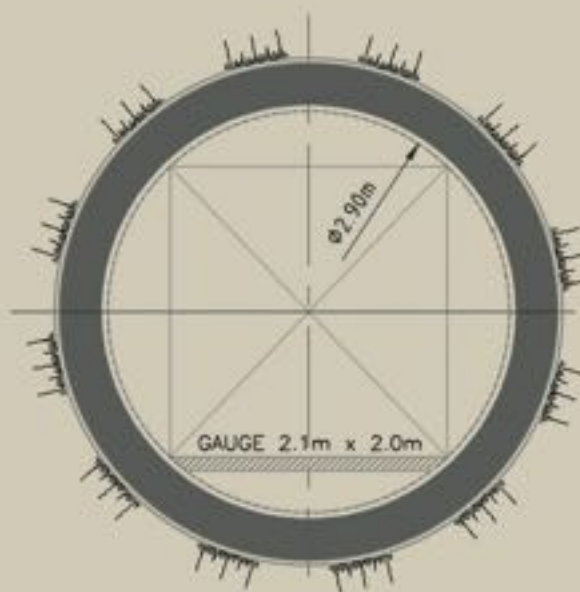
7- Comment réaliser la jonction structurale entre le rameau et les tunnels.

L'intuition qui a guidé la conception est la recherche d'une solution commune aux points 1, 2, 4, 5 et 7 de cette liste, par le biais d'un tympan béton polyvalent, coulé dans les tunnels principaux, et répondant à la fois aux enjeux temporaires et définitifs (figure 7).

Ce tympan est conçu pour :

- Raidir les tunnels principaux et s'opposer à leur ovalisation au voisinage de l'ouverture ;
- Ancrer les efforts du bâti de fonçage pour le creusement (4 plaques rouges sur la figure 7), ou de la cloche d'arrivée de l'autre côté ;
- Constituer la structure définitive, avec des dispositifs intégrés d'étanchéité et de réalisation de la porte d'accès au rameau ;
- S'intégrer dans l'environnement, par des rampes d'accès sur le trottoir piéton.

## COUPE D'UN RAMEAU



© DR 5

## CONCEPTION STRUCTURELLE

### Le tympan polyvalent

Ce tympan a été dimensionné via un modèle aux éléments finis volumiques pour tenir compte de la complexité de la géométrie et des chargements, à savoir :

→ En phase temporaire : transfert des efforts du revêtement du tunnel autour de l'ouverture ; efforts liés à l'équipement de fonçage.

→ En phase définitive : liés à l'interaction sol-structure.

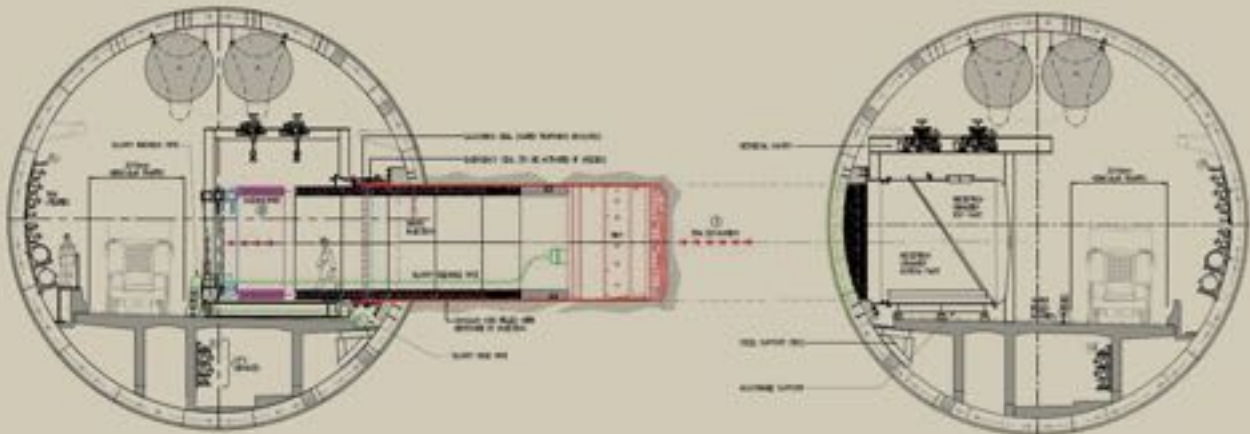
Les armatures du tympan, issues du modèle de calcul, sont principalement constituées de barres manchonnées sortant des voussoirs du tunnel principal (figure 8). Une structure monolithique est ainsi obtenue pour résister au cisaillement à l'interface et contre-carre l'ovalisation. Le taux de ferrailage moyen est d'environ 200 kg/m<sup>3</sup>.

### Œil de traversée dans les voussoirs

Le microtunnelier attaque et termine son creusement à travers le béton des voussoirs préfabriqués des tunnels principaux.



## ILLUSTRATION DU CONCEPT DE LA SOLUTION MÉCANISÉE



6 © DT

Un "œil de traversée" (*soft-eye*) doit être prévu dans ces zones, par l'emploi d'armatures en fibre de verre.

Des voussoirs hybrides ont été conçus et réalisés, constitués d'une cage d'armature mixte acier/fibre de verre, à laquelle s'ajoutent les armatures manchonnées pointant vers l'intrados pour la connexion ultérieure au tympan (figures 8 et 9).

La partie de ces voussoirs hybrides constituant l'œil de traversée a été peinte à l'intrados, pour prévenir toute erreur de positionnement et de montage lors du creusement des tunnels principaux.

### Le revêtement des rameaux

Le revêtement des rameaux est constitué classiquement par des éléments

tubulaires en béton armé, dimensionnés par les chargements temporaires (en phase de creusement) et définitifs (pour la structure permanente).

Les premiers et derniers éléments sont, en outre, équipés d'un joint gonflable à l'extrados, afin d'assurer l'étanchéité avec les tympans de départ et d'arrivée à la fin du creusement (figure 10).

### L'ÉTANCHÉITÉ

L'étanchéité de la structure est un facteur d'importance extrême sur ce projet, à tous les stades de la construction, étant donnée la charge d'eau (jusqu'à 5,5 bars) combinée à la forte perméabilité des sols. En outre, la réalisation des rameaux au fur et à mesure du creusement des tunnels principaux

**6- Illustration du concept de la solution mécanisée.**

**7- Tympan béton polyvalent.**

**6- Illustration of the mechanised solution concept.**

**7- Multi-function concrete front wall.**

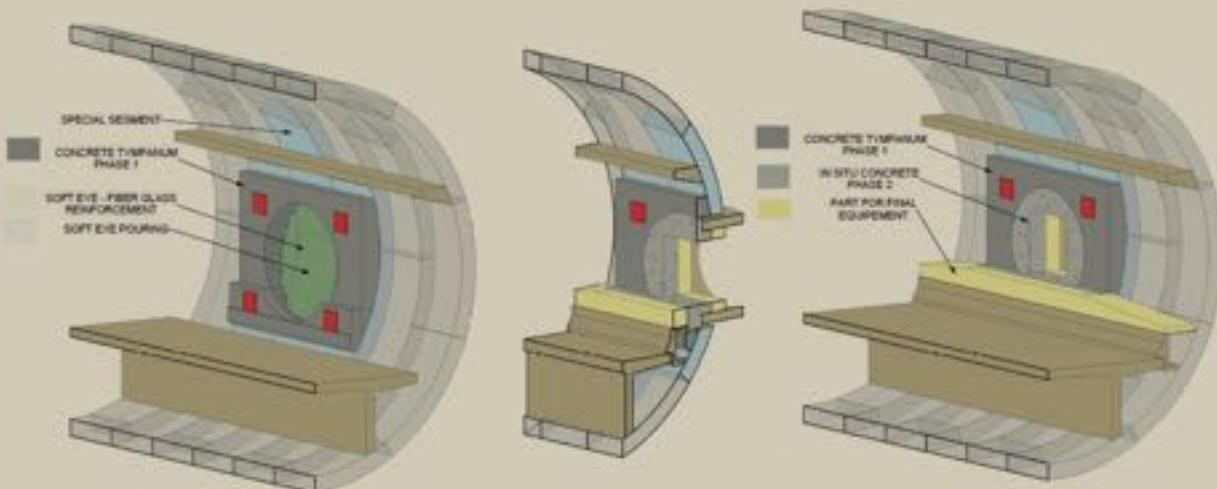
s'accompagnait de risques élevés pour le projet entier. Pendant la conception et le développement des méthodes, redondances et facteurs de sécurité ont été prévus pour éviter les venues d'eau.

## MÉTHODES DE CONSTRUCTION CONTRAINTES SPÉCIFIQUES

La cadence élevée de réalisation des rameaux (44 unités en moins de deux ans) a conduit à appliquer des méthodes d'analyse de type industrielle, avec des analyses de cycle précises et un souci constant de standardisation et de subdivision des tâches.

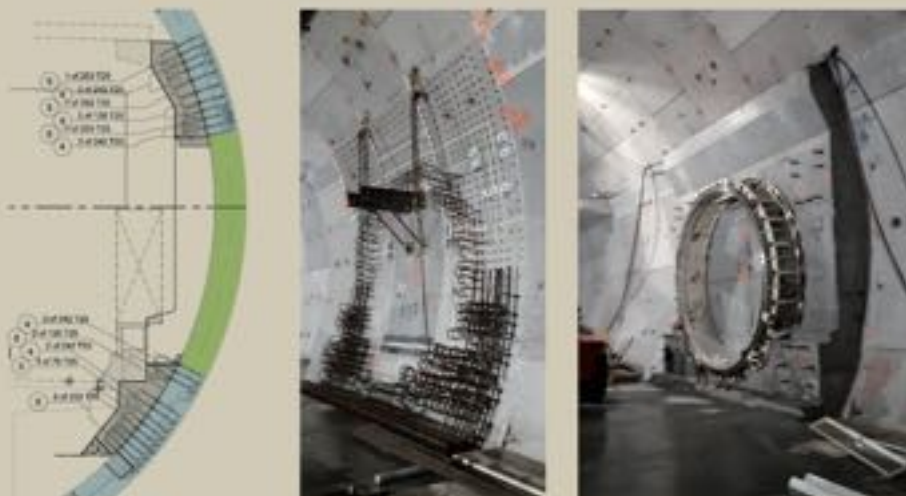
En plus de la contrainte de temps, la construction des rameaux devait être menée en parallèle de l'exécution des tunnels principaux, ce qui impliquait que la logistique principale (approvisionnement des voussoirs etc.) devait être préservée de tout impact. Aussi, un demi-tunnel a été consacré aux rameaux, avec l'autre moitié

## TYMPAN BÉTON POLYVALENT



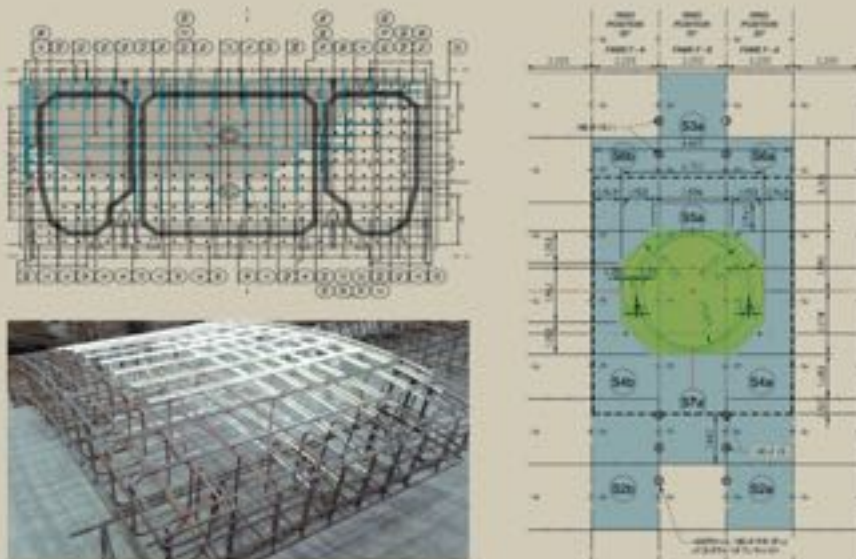
7 © DT

## FERRAILLAGE DU TYMPAN (gauche et centre) AVANT BÉTONNAGE (droite)



© DR 8

## VOUSOIRS HYBRIDES (gauche) ET "SOFT EYE" (droite)



© DR 9

gardée pour la logistique (figure 11). Des mesures spécifiques de contrôle de trafic ont été prévues, dans le tunnel, pour réguler la circulation autour des 200 m utilisés autour du rameau en cours d'excavation.

Dans la même optique, le microtunnelier possédait son propre réseau d'approvisionnement en boue bentonitique et de marinage, indépendant de celui des tunneliers principaux, moyennant une complexification du système de tuyaux et de pompes le long des tunnels.

### AVANT : COMMENT CONSTRUIRE LE TYMPAN

La surface intrados des voussoirs, constituant l'interface avec le tympan, est préalablement bouchardée pour

**8- Ferrailage du tympan (à gauche et au centre) avant bétonnage (à droite).**

**9- Voussoirs hybrides (à gauche) et "soft eye" (à droite).**

**8- Front wall reinforcing bars (on the left and centre) before concreting (on the right).**

**9- Hybrid segments (on the left) and "soft eye" (on the right).**

fournir une surface de reprise rugueuse. Les manchons sont découverts et connectés aux armatures du tympan, qui est finalement bétonné en deux phases.

Avant le coulage du béton, une couronne métallique est installée, qui servira ensuite à ancrer le bâti de fonçage et assurer étanchéité et confinement ; cette couronne métallique est maintenue par un outil spécifique qui la positionne dans le respect des tolérances.

Aussi, les 4 massifs d'ancrage équipés des barres de fixation sont placés à leurs emplacements respectifs.

Finalement, un outil coffrant auto-portant et réutilisable est utilisé pour la face avant (figure 12).

### PENDANT : COMMENT EXCAVER LE RAMEAU

#### Installation de l'équipement

Avant d'installer le microtunnelier au niveau du rameau, les tuyaux de boue de marinage sont déviés, puis les joints d'étanchéité sont connectés à la couronne métallique. Puis le bâti autoporteur (sur roues) comprenant les équipements est accosté en face de l'entrée du rameau, et les vérins de fonçage sont connectés aux 4 massifs d'ancrage.

#### Microtunnelier et fonçage des tuyaux

Le microtunnelier (AVN Herrenknecht à pression de boue) est installé dans le bâti en utilisant le portique intégré. Les joints d'étanchéité sont testés à 8 bars, avant le démarrage de la séquence d'excavation. Le cycle typique est constitué d'une phase d'excavation pendant le fonçage, puis d'une phase statique pour l'insertion du tuyau en béton suivant, avec l'utilisation d'un frein par frottement pour maintenir le rameau en place et éviter un recul de la machine (figure 14). Les réseaux sont allongés, profitant du fait que l'accès à l'intérieur du rameau est toujours possible pendant sa construction.

#### Étanchéité temporaire

Une fois que le microtunnelier a débouché dans le tunnel opposé, dans la cloche métallique de réception, les joints gonflables du premier et dernier tuyau sont injectés au mortier dans l'emprise des tympan, afin d'assurer temporairement l'étanchéité, le temps de réaliser la structure définitive.

#### Injection du vide annulaire

Le vide annulaire autour des tuyaux est injecté en veillant à la bonne substitution de la boue bentonitique par un remplissage de bas en haut, puis la pression dans la cloche d'arrivée est graduellement abaissée en surveillant le comportement de l'ensemble des éléments du rameau, avant l'ouverture finale (figure 1).

#### Récupération du microtunnelier

Après une dernière poussée du bâti, le microtunnelier est récupéré dans la cloche, qui est ensuite démantelée. Tous les éléments sont ensuite transportés dans leurs tunnels respectifs jusqu'au rameau suivant (figure 15).

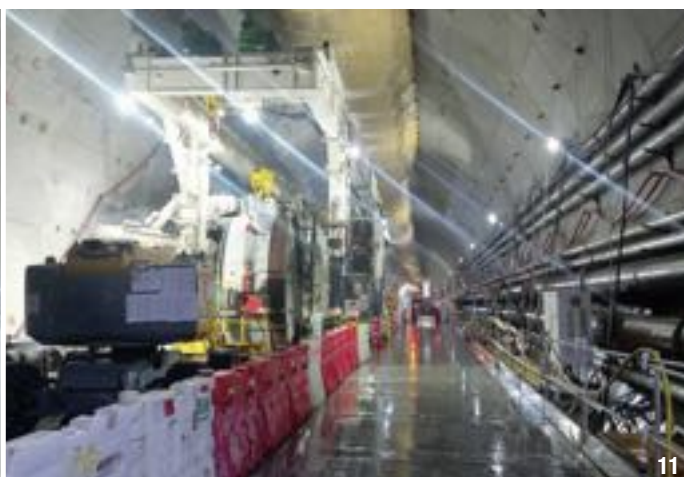
### APRÈS : COMMENT RÉALISER LA STRUCTURE DÉFINITIVE

Les travaux de réalisation de la structure définitive peuvent commencer une fois que tous les éléments ont été démantelés, sous la protection de l'étanchéité provisoire. ▷





10



11

Tout d'abord, le radier du rameau est coulé pour fournir aux équipes une surface de travail et de circulation plane, puis les armatures des encadrements de porte sont positionnées dans l'emprise des tympans.

Une membrane d'étanchéité projetée est appliquée, avant coulage du béton, et des tuyaux de réinjection sont prévus pour l'opération finale d'étanchement (figure 16).

Les derniers bétons sont finalement coulés avec des coffrages traditionnels, puis les tuyaux de réinjections sont utilisés pour sceller la structure définitive contre les venues d'eau.

### CONSTRUCTION & ENSEIGNEMENT TIRÉS

#### ORGANISATION & CYCLE DE PRODUCTION

La production est organisée en trois postes, 7 jours par semaine et 24 h par jour, avec une équipe de 20 personnes par poste. Le cycle typique est résumé dans le tableau 2.

#### PRINCIPAUX POINTS À RETENIR

##### Logistique

Le défi majeur pour la logistique était la cohabitation avec le fonctionnement des tunneliers principaux, tout en assurant des durées de mobilisation et démobilitation aussi court que possible, qui représentent finalement quand même près de la moitié du temps de cycle.

Les équipements, bâti auto-porteur etc. ont été conçus pour cette course contre la montre, avec une forte impli-

**10- Élément tubulaire transporté dans le tunnel principal.**

**11- Circulation & logistique dans un demi-tunnel au droit du rameau.**

**12- Coffrage face avant (à gauche), couronne & 4 massifs d'ancrage (à droite).**

**13- Bâti autoporteur et équipements en face d'un rameau.**

**14- Accès à l'intérieur du rameau (à gauche), insertion d'un nouveau tuyau (à droite).**

**10- Tube element transported in the main tunnel.**

**11- Traffic & logistics in a half-tunnel at the level of the connecting gallery.**

**12- Front formwork (on the left), core bit & 4 anchoring foundations (on the right).**

**13- Self-supporting frame and equipment opposite the connecting gallery.**

**14- Access to the connecting gallery (on the left), insertion of a new pipe (on the right).**



12



13



14

TABLEAU 2 : CYCLE TYPIQUE DE PRODUCTION

Mobilisation	Percement d'entrée	Excavation	Percement de sortie	Démobilisation
5 jours	2 jours	2 jours	5 jours	6 jours



© DFR 15



16

cation des équipes Herrenknecht.

#### Guidage du microtunnelier

La courte longueur des rameaux laissait peu de place à un rattrapage d'éventuelles erreurs ou imprécisions de guidage ; aussi, la conception toute entière a dû intégrer une chaîne de tolérances successives pour chacune des étapes.

La tolérance d'arrivée dans la cloche métallique de +/- 100 mm a toujours été respectée.

#### Injection du vide annulaire

La bentonite qui remplissait le vide annulaire pendant l'excavation a été progressivement substituée par un

mortier actif une fois le rameau excavé, via des inserts préalablement installés dans les tuyaux.

#### Finitions

Un grand avantage de la solution est que les travaux de seconde phase sont très réduits dans les rameaux, puisque ce sont les tuyaux forcés qui constituent directement le revêtement définitif. Seuls les encadrements aux deux extrémités sont réalisés à la fin.

#### Amélioration du cycle

Comme illustré dans la table du cycle de production, le cycle initial de 35 jours a été considérablement optimisé pour atteindre 20 jours en

**15- Microtunnelier chargé sur son camion, en route vers le rameau suivant.**

**16- Membrane d'étanchéité projetée à la jonction du tympan, avant coulage du béton.**

**17- Vue de l'intérieur d'un rameau d'évacuation terminé.**

**15- Microtunnelier loaded on its truck, heading toward the following connecting gallery.**

**16- Waterproofing membrane sprayed on the front wall joint, before pouring concrete.**

**17- View of the inside of a completed evacuation gallery.**

fonctionnement normal. Il serait encore possible de le raccourcir, principalement en réduisant encore les durées de mobilisation.

Cette optimisation s'est accompagnée d'un problème inattendu : le béton des tympans avait tout juste la résistance requise lorsque l'équipement de fonçage se présentait devant lui.

#### CONCLUSION

La technique développée dans le cadre de ce projet a permis de réaliser les 39 rameaux en moins de 13,5 mois, et ce dans toutes les conditions géologiques et sous forte charge d'eau. La solution mécanisée a permis de sécuriser le calendrier du projet, tout en réduisant les risques liés à la construction.

De la conception à la réalisation, le fil conducteur du développement a été la recherche d'un cycle robuste et l'industrialisation du processus, ainsi que l'utilisation maximale des éléments de structure définitive - tel le tympan - pour les besoins des situations transitoires.

Ce concept a été récompensé par deux *New Civil Engineer Tunnelling Awards*, à Londres en 2017, ainsi qu'une mention "highly commended". □



© DFR 17

#### ABSTRACT

### MECHANISED CONSTRUCTION OF INTERTUBE CONNECTING GALLERIES

ESTELLE CAGNAT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - MORGAN OLERON, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - THIBAUT LOCKHART, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**The Tuen Mun Chek Lap Kok Tunnel in Hong Kong** involves the construction of two tubes of diameter 14 metres connected by 56 galleries in unconsolidated strata and under a significant water head. An innovative technique has been developed for industrial construction of the tubes, by adapting an excavation system from one tunnel to another; the microtunnel boring machine arrives in a steel bell, through the design of a multi-function concrete front wall and special hybrid segments. □

### CONSTRUCCIÓN MECANIZADA DE RAMAS INTER-TUBOS

ESTELLE CAGNAT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - MORGAN OLERON, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - THIBAUT LOCKHART, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

**El túnel Tuen Mun Chek Lap Kok, en Hong-Kong,** incluye la realización de dos tubos de 14 m de diámetro unidos por 56 ramas en terreno blando y bajo una fuerte carga de agua. Se ha desarrollado una técnica innovadora para realizarlos de manera industrial, que consiste en adaptar un dispositivo de excavación de un túnel a otro. Así, la micro-tuneladora llega a una campana de acero frontal mediante el diseño de un tímpano de hormigón polivalente y dovelas especiales híbridas. □





1

© SÉBASTIEN MARCHAL

# VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) À LA RÉUNION : UNE BARGE AUTOÉLÉVATRICE SOULEVANT 4 800 t

AUTEUR : OLIVIER JESTIN, INGÉNIEUR MÉTHODES TRAVAUX MARITIMES, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

L'IMPLANTATION EN SITE OCÉANIQUE OUVERT DU VIADUC EN MER DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL À LA RÉUNION A CONDUIT LE GROUPEMENT D'ENTREPRISES EN CHARGE DE SA CONSTRUCTION À LIMITER AUTANT QUE POSSIBLE LES TRAVAUX EN MER, OPTANT AINSI POUR LA PRÉFABRICATION À TERRE COMPLÈTE DES PILES ET DU TABLIER ASSOCIÉE À DES MOYENS LOURDS DE TRANSPORT, MANUTENTION ET ASSEMBLAGE SUR SITE DES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS. C'EST AINSI QU'EST NÉE LA BARGE *ZOURITE* CHARGÉE DE CONSTRUIRE LES PILES.

## PRÉSENTATION

*Zourite*, qui signifie « petit poulpe » en créole réunionnais, est une barge autoélévatrice de dimensions en plan 107 x 44 m, soit l'équivalent d'un terrain de football (figure 1). Elle est dotée de 8 jambes et d'une charpente sur laquelle circule un pont roulant de 4 800 t de capacité. Les entreprises du groupement titulaire du marché de construction du viaduc en mer de la Nouvelle Route du Littoral (NRL), à savoir Vinci Construction Grands Projets (mandataire), Bouygues Travaux Publics, Demathieu Bard Construction et Dodin Campenon Bernard, ont développé cet outil « sur mesure » adapté au

travail en mer ouverte et à l'échelle des dimensions et des poids des éléments préfabriqués.

L'ouvrage de 5 400 m repose sur 48 piles. Le tablier est constitué de sept tronçons successifs séparés par des joints de chaussée. La portée des travées courantes est de 120 m ; les travées de rive de part et d'autre des joints de chaussée ont une portée de 86,50 m (figure 2).

Chaque pile se décompose en 3 parties : une embase de 4 400 t, une tête de pile de 2 400 t et un mini-fléau de 2 400 t également (figure 3).

Chaque pièce préfabriquée de la partie basse est un élément unique :

### 1- *Zourite*.

### 1- *Zourite*.

→ Chaque embase dépasse de 3 m le niveau de l'eau de mer afin de pouvoir être coiffée de la tête de pile et d'un mini-fléau ;

→ Chaque tête de pile est ajustée en fonction du niveau du viaduc.

Seuls des mini-fléaux sont similaires sauf au niveau des piles culées où ils sont séparés en deux parties distinctes. Voici l'ensemble des tâches qu'il y a à réaliser :

→ Charger et transporter les 144 éléments préfabriqués du site de pré-fabrication au site de pose ;

→ Les placer en mer avec la précision requise ;

→ Régler la verticalité de ces éléments ;

→ Claver ces éléments entre eux ;

→ S'affranchir autant que possible de l'attente des fenêtres météo.

Le levage en mer d'éléments préfabriqués de plusieurs milliers de tonnes est généralement réalisé à l'aide de machines apparentées à des grues flottantes comme ce fut notamment le cas pour la construction du Pont de la Confédération (Canada), du Viaduc de



2

© LAURENT DE GEBHARDT

l'Oresund (Danemark) ou de la Seconde traversée du Tage (Portugal). Mais l'utilisation de tels bateaux-grues comme *Svanen* ou *Rambiz* est extrêmement dépendante des conditions de mer pour la navigation en charge et à vide entre le site de préfabrication et le site de pose, comme pour les opérations de maintenance sur le site de pose. L'analyse statistique des états de mer courants comme exceptionnels (tempêtes et cyclones) propres à La Réunion a montré que le nombre et la durée des fenêtres météo disponibles en année

**2- Vue déformée du viaduc dans son ensemble.**

**3- Décomposition d'une pile.**

**2- Deformation view of the viaduct as a whole.**

**3- Breakdown of a pier.**

moyenne pour l'utilisation d'une grue flottante de très forte capacité n'étaient pas compatibles avec les exigences techniques et de sécurité dans le délai imparti pour la construction du viaduc. C'est dans ce contexte d'étude qu'est née *Zourite*, un outil unique permettant de répondre à l'ensemble des contraintes du chantier de la Nouvelle Route du Littoral. Chaque organe de ce poupe métallique de 13500 t a été imaginé et dimensionné pour répondre aux différentes problématiques du chantier.

### UN FLOTTEUR CHARPENTÉ

L'ensemble constitué par le flotteur et la charpente métallique représente une masse équivalente à celle de la tour Eiffel (7300 t).

Le flotteur est équipé de compartiments de ballastage afin de pouvoir ajuster l'assiette et la gîte du navire selon les différents chargements (figure 4).

La charpente est conçue pour recevoir le pont roulant en respectant les exigences sur la déformation des poutres lors du passage de celui-ci.

Une ouverture d'environ 24 x 27 m - le *moonpool* - sur l'arrière de la barge permet de mettre le colis à l'eau.

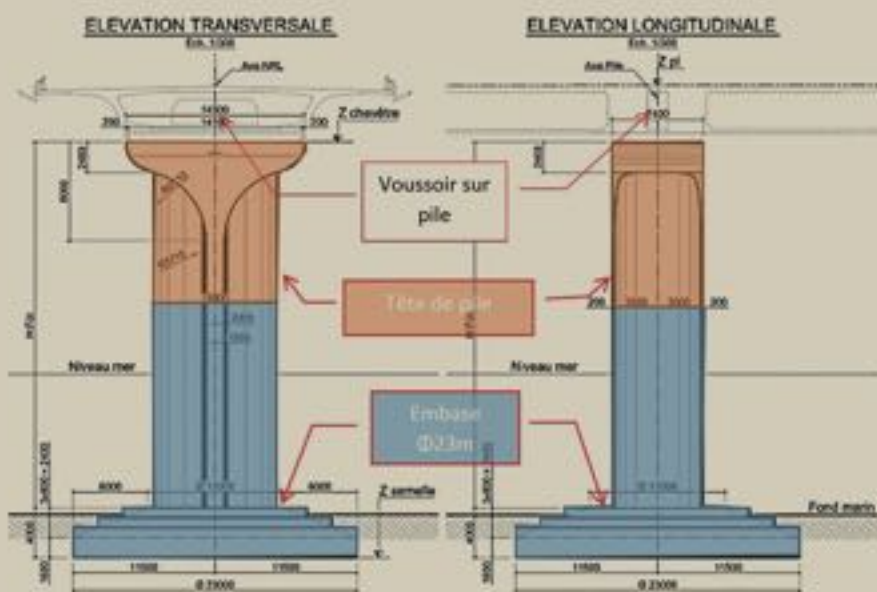
### LES JAMBES ET LE SYSTÈME D'AUTO-ÉLÉVATION

Le flotteur est équipé de 8 systèmes d'autoélévation d'une capacité de 4000 t chacun, fonctionnant sur vérins et sur broches permettant de se hisser sur des pieux métalliques de diamètre 3 m. Ce système est installé à l'abri des *jack houses* en protubérance de la coque.

Le flotteur est accroché par ces broches aux jambes et il est surélevé par les vérins sur une course de 1,5 m. Un second étage de broches permet de transmettre la masse du flotteur à un autre niveau de la jambe, permettant le repli du vérin pour une nouvelle course de 1,5 m.

Le système d'élévation permet non seulement de monter la barge au-dessus de l'eau pour la pose et la construction en sécurité (figure 1), mais il offre aussi la possibilité de se positionner au-dessus de la houle cyclonique au besoin, soit une élévation de plus de 11 m au-dessus du niveau de l'eau.

### DÉCOMPOSITION D'UNE PILE



© PHOTOTEQUE VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

3



Cette aptitude offre l'opportunité de rester en place en cas de conditions météorologiques défavorables sans être nécessairement contraint de rentrer au port.

Lorsque la barge flotte, les jambes sont supportées par la coque toujours par l'intermédiaire des broches.

### LE PONT ROULANT

Le pont roulant a une capacité de levage de 2 x 2400 t et offre la liberté de modifier les entraxes des points de levage afin de s'adapter aux différents colis (figure 5). Avec la charge la plus lourde, le pont roulant est encore capable de régler transversalement le colis de 0,5 m (*offset*). Lorsque *Zourite* arrive sur le site de pose, elle se positionne sur ses jambes, se met en sécurité, puis le colis est libéré de son *saisissage* de navigation.

Le pont roulant soulève alors la pièce, la transfère au-dessus du *moonpool* et l'immerge au-dessus de son lit de pose. Un pont auxiliaire de 27 t vient s'ajouter pour la maintenance du pont roulant et l'organisation du pont de la barge. Grâce aux degrés de liberté conférés par le pont roulant, les éléments préfabriqués peuvent être placés avec une grande précision.

### LE SYSTÈME DE PROPULSION

La barge est équipée de 4 systèmes de propulsion (900 kW chacun) qui la rendent complètement indépendante et qui permettent la navigation du site de préfabrication au site de pose avec une durée moyenne de 2 heures environ. Un système de positionnement dynamique a été intégré à la barge afin qu'elle puisse maintenir sa position à 1 m près, le temps de déployer ses jambes. Les photos de la figure 6 illustrent le système de propulsion.

### LA PASSERELLE (POSTE DE PILOTAGE)

La passerelle ou poste de pilotage est l'endroit où se concentre l'ensemble des informations du navire : la vitesse, le niveau des ballasts, le système de positionnement, le niveau des jambes dans les *jack houses*, ainsi que l'ensemble des systèmes de commande (figure 7). Le capitaine y détient l'ensemble des informations du navire et s'assure de la sécurité des hommes à bord.

Une passerelle déportée située à l'arrière du navire a été placée dans un souci de redondance en cas de panne. La commande du pont roulant a été installée dans cette passerelle dépor-

## DESCRIPTION DE ZOURITE



4

© PHOTOTHÈQUE VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

tée car elle ainsi mieux placée vis-à-vis du levage.

### LE GÉNÉRATEUR DE PUISSANCE

Un générateur de puissance de 5 MW suffit à alimenter ce géant des mers, soit la production moyenne d'une éolienne offshore de 125 m de diamètre. La mutualisation des énergies a permis la diminution de la puissance

4- Description de *Zourite*.  
5- Pont roulant.

4- Description of *Zourite*.  
5- OT crane.

totale installée. En effet, la barge consomme un maximum d'énergie en navigation, et le générateur peut alimenter l'ensemble des équipements autres que la propulsion en auto-élévation.

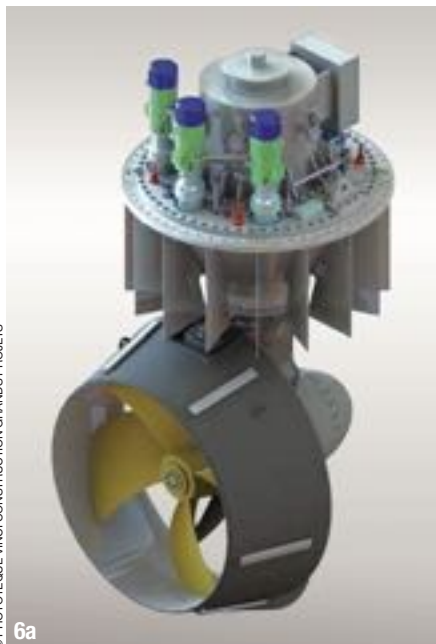
### LE SYSTÈME DE RIPAGE

Afin de permettre le transfert depuis le site de préfabrication sur la barge,



5

© PHOTOTHÈQUE VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS



un chemin de ripage a été installé et le pont a été renforcé pour se conformer aux besoins du système de ripage (figure 9).

C'est un système qui fonctionne avec des rails et des vérins sur coussins d'air.

Le déplacement est aussi réalisé à l'aide d'un vérin qui vient se clamper sur les bords du rail.

**6- Propulseurs Schottel 900 kW.**

**7- Passerelle de Zourite.**

**6- 900 kW Schottel thrusters.**

**7- Zourite gangway.**

#### LA CENTRALE À BÉTON (POUR LE COULIS ET LE CLAVAGE)

Une centrale à béton a été intégrée à cette barge (figure 8) afin de produire à bord le coulis de remplissage des sacs situés sous la pile afin d'assurer la portance sous toute la surface de la pile et le béton du clavage entre les 2 premiers éléments préfabriqués (embase et tête de pile).

#### LA VIE À BORD

Un équipage de 6 personnes suffit à piloter *Zourite* en comptant le capitaine, le chef mécanicien et 4 marins. Les espaces de vie et les bureaux permettent donc à 12 marins de séjourner sur la barge 24h/24, afin de gérer les 2 postes de travaux. Ce sont eux qui assurent la sécurité des compagnons. Le capitaine indique lorsque que la barge est sécurisée sur ses jambes et permet alors à l'équipe de génie civil de monter à bord. En cas d'évacuation, c'est à nouveau l'équipage de la barge qui gère l'opération. La barge est conçue pour accueillir un maximum de 50 personnes au total (38 compagnons au maximum pour les travaux de chantier). Tous les organes de sécurité et le processus d'évacuation du navire sont dimensionnés en fonction de ce nombre. Les espaces de vie (figure 10) sont aussi conçus pour accueillir en roulement les travailleurs du génie civil lors de leurs pauses.

#### LA CLASSIFICATION BUREAU VERITAS

En tant que navire battant pavillon français, *Zourite* a dû obtenir auprès des Affaires Maritimes (Ministère des Transports) et sous le contrôle du Bureau Veritas, la classification suivante :

« Navire de charge d'une jauge brute supérieure à 500 tonneaux qui sera certifié pour effectuer des voyages internationaux ».

Son port d'immatriculation est Le Havre.

#### LA CONSTRUCTION EN POLOGNE

La fabrication a eu lieu au nord de l'Europe sur le chantier Crist à Gdynia en Pologne (figure 11). La durée totale de construction sur le chantier naval a été de 15 mois.

#### LE TRANSPORT

La barge ne pouvait pas exécuter de voyage d'elle-même, de par les accélérations créées par la houle sur ce long trajet entre la Pologne et La Réunion en passant par le Cap de Bonne Espérance, ce qui a conduit l'équipe projet à organiser un *dry tow* (remorquage à sec) sur un navire semi-submersible de 223 m de long. Pour charger *Zourite*, le navire semi-submersible a été ballasté pour que son pont descende en dessous du tirant d'eau du bateau chargé. Puis, à l'aide de remorqueurs, *Zourite* a été amenée au-dessus du navire semi-submersible avant que ce dernier ne retire l'eau de ses ballasts pour remonter le colis chargé au-dessus de l'eau (figure 12).







8

© PIERRE-EDOUARD DENIS

Une fois le convoi arrivé à La Réunion, la procédure inverse a été réalisée pour décharger la barge : le navire semi-submersible a été ballasté pour libérer *Zourite* qui a alors été prise en charge par des remorqueurs jusqu'au port de La Réunion.

Il aura fallu 2 ans et 5 mois à l'équipe chargée de la barge pour assurer la conception, les appels d'offre, la construction et la livraison de la barge à La Réunion.

#### CYCLE ET MISE EN CADENCE

Après une période de tests de la barge et de réalisation de la certification, la barge a pu installer sa première pile. Voici la description complète du cycle type :

- 1- La barge s'approche du quai et vient buter sur des défenses et se placer en face du chemin de ripage terrestre. Les jambes sont alors descendues afin de déjauger la barge et placer le pont au niveau du quai. Une poutre de transition est ajoutée pour faire le lien entre la barge et le quai.
- 2- L'embase est alors ripée sur la barge et posée sur les appuis spécifiquement prévus pour cela. La sécurisation par *saisissage* de l'embase est alors requise afin d'encaisser les accélérations dues à la houle lors du transport sur site. La poutre de transition est enlevée et la barge peut être remise à flot pour effectuer la navigation vers le site de pose.



9

© PHOTOTEQUE VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

8- Centrale à béton.  
9- Système de ripage.  
10- Espace de vie de *Zourite*.

8- Concrete mixing plant.  
9- Sliding system.  
10- *Zourite* living area.



10

© PHOTOTEQUE VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS





11

© CRIST/VIADUC LITTORAL

**3-** Approchant la position théorique de la pile à mettre en place, le système de positionnement dynamique intégré est mis en marche afin de stabiliser la barge. Les jambes sont alors déployées et la barge est déjaugée de manière à ce que la coque soit surélevée de 4 m au-dessus du niveau de la mer. La barge est alors sécurisée et le capitaine autorise le personnel de chantier à utiliser le pont roulant.

**11- Construction de la barge en Pologne.**

**12- Remorque à sec de *Zourite*.**

**11- Construction of the barge in Poland.**

**12- Towing the *Zourite* on dry land.**

**4-** Le *saisissage* de l'embase est retiré et le pont roulant vient placer les appareils de levage sur le colis. Celui-ci est soulevé, translaté le long du pont et placé au-dessus de l'ouverture de la coque dans la barge. Là, l'embase est descendue à 40 cm du lit de pose et des vérins sont déployés pour stabiliser l'ensemble.

**5-** L'embase reste principalement maintenue par le pont roulant et

une partie de la charge seulement est transférée sur les vérins pour la stabilisation et le réglage fin.

**6-** L'équipe de génie civil entre alors en action pour venir injecter des sacs de coulis. Les sacs, accrochés au préalable à l'embase, viennent se gonfler à mesure de leur remplissage et épouser les imperfections du lit de pose et permettre un contact maximal entre la sous-face de l'embase et le lit de pose. ▷



12

© SEBASTIEN MARCHAL





13

© SÉBASTIEN MARCHAL

Une fois que le coulis a acquis une résistance suffisante, le pont roulant relâche l'embase et va se replacer en position de navigation où il est sécurisé.

7- La barge se remet ensuite à flot pour retourner au port et aller chercher la tête de pile et le voussoir sur pile (les deux éléments en même temps sur la barge).

Le cycle pour ce second voyage est sensiblement le même, exception faite de l'injection des sacs de coulis remplacée par le clavage entre l'embase et la tête de pile.

Le voussoir sur pile est posé sur la tête de pile ; il sera précisément réglé et

13- *Zourite* vue panoramique.

13- *Zourite* - panoramic view.

brûlé lors du passage du lanceur en charge de l'assemblage du tablier.

La cadence attendue de 2 piles par mois a été atteinte par la barge.

La moitié des piles du viaduc ont été ainsi posées à fin 2017. □

## CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

**LONGEUR HORS TOUT (HT) : 108,0 m**

**LONGUEUR COQUE : 107,0 m**

**LARGEUR HORS TOUT (HT) : 47,5 m**

**LARGEUR COQUE : 44,0 m**

**CREUX SUR QUILLE : 7,0 m**

**FRANC-BORD MINI : 4,0 m**

**FRANC-BORD MAXI : 5,1 m**

**TIRANT D'AIR MAXI : 51,7 m**

**DÉPLACEMENT MAXI : 19 089 t**

**MASSE DU NAVIRE LÈGE : 13 640 t**

**PORT EN LOURD : 5 460 t**

**CHARGE UTILE : 4 730 t**

**VITESSE MAXI FB = 5,05 m (ESSAIS) : 4,1 noeuds**

### ABSTRACT

#### VIADUCT ON THE NEW COASTAL ROAD ("NRL") ON REUNION ISLAND: A SELF-JACKING PLATFORM BARGE LIFTING 4800 TONNES

OLIVIER JESTIN, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

The large-capacity self-jacking platform barge *Zourite*, lifting 4800 tonnes, is the main equipment for construction of the sea viaduct for the New Coastal Road located in the north-western part of Reunion Island. This structure is a bridge 5.4 km long, positioned in the open sea at a distance of between 100 and 200 metres from the shore. It is executed by the consortium formed by Vinci Construction Grand Projets, Bouygues Travaux Publics, Demathieu Bard Construction and Dodin Campenon Bernard. The 48 bridge piers, formed of a base and a pier cap, on which rests the segment on pier, are spaced between 85m and 120m apart. *Zourite* offers a combination of functionalities which make it possible, in a difficult environment, to load parts in the port, transport them by sea, and place them precisely and safely. □

#### VIADUCTO DE LA NUEVA CARRETERA DEL LITORAL EN LA REUNIÓN: UNA BARCAZA AUTOELEVADORA DE 4.800 T DE CAPACIDAD

OLIVIER JESTIN, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

La barcaza auto-elevadora de alta capacidad *Zourite*, que puede levantar 4.800 t, es el equipamiento principal que permite la realización del viaducto en el mar de la Nueva Carretera del Litoral, al noroeste de la isla de la Reunión. La obra consta de un puente de 5,4 km de longitud situado en mar abierto, a una distancia de entre 100 y 200 m de la costa, y realizado por el consorcio Vinci Construction Grand Projets, Bouygues Travaux Publics, Demathieu Bard Construction y Dodin Campenon Bernard. Los 48 pilotes del puente, formados por una base y una cabeza de pilote, sobre los que reposan las dovelas, están separados por una distancia de 85 a 120 m. *Zourite* ofrece una combinación de funciones que permite, en un entorno difícil, cargar las piezas en el puerto, transportarlas por vía marítima y posicionarlas con precisión y seguridad. □



# SMA



**Ensemble,  
allons plus loin !**

L'assureur de toutes les entreprises,  
des professionnels, des dirigeants,  
de leurs salariés et de leurs proches.

Retrouvez tous nos produits d'assurance sur [groupe-sma.fr](http://groupe-sma.fr)



  
**SMABTP**  
SAISIE L'ASSURANCE AVEIL ASSURANCE

**SMA** **VIE**

**SMA**  
ASSURANCES

**SMA**  
COURTAGE

**SMA** **VIE**  
COURTAGE



# PRÉSERVONS L'AVENIR



Travaux de protection contre  
les chutes de blocs sur la  
RD215.

Dans un contexte sensible, marqué par des phénomènes d'éboulements fréquents, Maccaferri apporte son expérience et sa capacité d'innovation dans la réalisation d'ouvrages de haute technicité et d'une exceptionnelle longévité.

Ses solutions sont pensées pour protéger les populations et les infrastructures autour d'une double préoccupation : s'intégrer au cadre naturel et réduire l'impact carbone du site.

Une réponse adaptée à la dimension financière et écologique de chaque projet.

**MACCAFERRI**

Villarodin-Bourget, Savoie  
Ecrans pare-blocs RMC 300/A - 156 ml

[www.maccaferri.com/fr](http://www.maccaferri.com/fr)