

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

ENERGIE. RECOMMANDATIONS FRANCAISES : GEOTECHNIQUE ET GEOSTRUCTURES THERMIQUES. REVETEMENT ROUTIER PHOTOVOLTAIQUE. GRAND PARIS : ENERGIE D'UN TERRITOIRE. CONSTRUCTION CENTRALE HYDROELECTRIQUE DU POUZIN. RTE ET SES CHANTIERS DE LIAISONS SOUTERRAINES. PARC NUCLEAIRE FRANCAIS : DIESEL D'ULTIME SECOURS. REMPLACEMENT CONDUITE DE REFOULEMENT DE POMPAGE LAC D'ARTOUSTE. TRESORS DE NOS ARCHIVES : CHUTE ISERE-ARC - CENTRALE DE RANDENS

N°926 SEPTEMBRE 2016



PARC ÉOLIEN DE
BEAUCAIRE DANS
LE GARD

© CNR - C. MORENC -
J. ROBERT

LES TRAVAUX
PUBLICS FEDÉRATION
NATIONALE

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@fntp.fr**Comité de rédaction**

Hélène Abel (Ingerop), David Berthier (Vinci Construction France), Sami Bounatirou (Bouygues TP), Jean-Bernard Detry (Setec), Philippe Gotteland (Fntp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fntp), Laurent Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar (Eiffage TP), Florent Imbert (Razel-Bec), Claude Le Quééré (Egis), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage TP), Philippe Vion (Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction
Monique Trancart, Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com**Service Abonnement TRAVAUX**
Bât. Copemic - 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.frFrance (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**Directeurs de clientèle**Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.frCarine Reiningier - LD 01 42 21 89 05
c.reiningier@rive-media.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée****Com'1 évidence**
Siège :
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
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).

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

LE NUCLÉAIRE AU SERVICE DE L'ÉCONOMIE BAS CARBONE DE DEMAIN



© DETIENNE AUGUSTIN

L'énergie est au cœur des enjeux du 21^e siècle. L'accord trouvé à Paris lors de la 21^e Conférence des Parties (COP 21) confirme la mobilisation contre le changement climatique et la montée en puissance des transitions énergétiques au-delà de l'Europe.

Dans ce contexte, alors que l'Union Européenne a fixé un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40% sur la période 1990 - 2030, l'accroissement de la part de l'électricité dans les sources de production d'énergie, en substitution progressive des énergies fossiles, est une voie obligatoire pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La France, grâce à un mix énergétique basé sur le nucléaire et les énergies renouvelables, dispose d'un avantage compétitif qui se mesure par ses émissions de CO₂ établies aujourd'hui à 15 g/kWh alors que la moyenne européenne se situe à 325 g/kWh, tandis que l'Allemagne enregistre un niveau d'émissions à 400 gr/kWh.

La transition énergétique est aujourd'hui en marche. Pour EDF, il s'agit d'ores et déjà d'une réalité stratégique basée sur notre volonté d'industriel d'accompagner nos clients et nos territoires vers des solutions

énergétiques bas carbone compétitives ; d'équilibrer plus encore notre mix de production en accélérant le développement des énergies renouvelables et en garantissant la sûreté et la performance du parc nucléaire existant et du nouveau nucléaire aux côtés de 8 des 10 plus grands pays qui dans le monde ont choisi d'assurer leur développement énergétique en s'appuyant sur l'énergie nucléaire.

En cohérence avec la priorité d'une production bas carbone, des mesures visant au relèvement du prix du CO₂ doivent être mises en place sans plus attendre, afin en particulier d'orienter les décisions des acteurs industriels et financiers et de modifier les habitudes énergétiques des consommateurs.

Convenons qu'aujourd'hui les conditions de prix ne sont pas toutes réunies pour permettre l'émergence d'une réelle économie décarbonnée. Dans l'accompagnement de ces évolutions, le nucléaire est incontestablement une solution efficace. Efficace au plan de la réponse énergétique, nous l'avons déjà souligné ; efficace au plan de la réponse industrielle, la filière nucléaire française, bien qu'en restructuration, demeurant un atout pour notre pays dans le concert économique mondial, avec une perspective d'EBITDA multipliée par 5 hors zone Europe ; efficace enfin au regard du développement économique tant la réalisation d'un programme nucléaire est un gisement d'emplois, en phase d'ingénierie comme en phase d'exploitation.

Bien sûr, cette perspective nécessite d'assurer la maîtrise industrielle des projets qui se construisent avec des partenaires industriels solides et compétents et à qui les grands donneurs d'ordre sont en capacité de donner de la vision à long terme. C'est ce qui guide la restructuration de la filière nucléaire Française.

Au regard de l'urgence climatique et des réponses possibles, le nucléaire s'impose comme l'une des solutions bas carbone incontournables dans un mix équilibré avec les énergies renouvelables pour gagner demain le pari de la croissance économique durable.

XAVIER URSATDIRECTEUR EXÉCUTIF GROUPE D'EDF -
DIRECTEUR DE L'INGÉNIERIE ET DES PROJETS NOUVEAU NUCLÉAIRE



ÉNERGIE

PARC PHOTOVOLTAÏQUE ET ÉOLIEN DE BOLLÈNE - VAUCLUSE © CNR - CAMILLE MORENC - JUAN ROBERT



04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



18

**ENTRETIEN AVEC
JEAN-FRANÇOIS SIMON**
HYDROQUEST - LA BONNE IDÉE :
UNE ARCHITECTURE À AXE
VERTICAL

22 CNR : DE L'EAU DU RHÔNE AU SOLEIL
ET AU VENT



30

**RECOMMANDATIONS
FRANÇAISES**

pour la conception géotechnique
et la réalisation des géostructures
thermiques



34

WATTWAY

Le 1^{er} revêtement routier
photovoltaïque au monde



40

GRAND PARIS

L'énergie d'un territoire



46

**CONSTRUCTION DE
LA PETITE CENTRALE
HYDROÉLECTRIQUE**

et de la passe à poissons
du Pouzin



52

RTE

et ses chantiers de liaisons
souterraines



58

PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

Conception et installation
des diesels d'ultime secours
(DUS)



64

**REMPLACEMENT DE LA
CONDUITE DE REFOULE-
MENT DE POMPAGE**

au lac d'Artouste (64)



73

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES :

**CHUTE ISÈRE-ARC -
CENTRALE DE RANDENS**

Numéro 195 - janvier 1951



LA ROUTE PASSE SON TEMPS À REGARDER LE CIEL

COLAS en est au stade opérationnel de son projet Wattway de chaussée productrice d'électricité photovoltaïque, dont les études ont commencé en 2010 à partir de ce constat « *Rien qu'en France métropolitaine, pas moins de six milliards de mètres carrés sont utilisés pour le passage des véhicules, avec entre chaque véhicule un temps suffisant pendant lequel la chaussée regarde le ciel. Pourquoi ne pas imaginer une chaussée qui contribuerait à fournir de l'énergie par elle-même ?* ». Jules Verne n'y avait pas pensé. Science & Vie ne l'a pas dévoilé. Le premier chantier opérationnel fonctionne depuis mai 2016 dans le département de la Vendée.

(voir article page 34).



© COLAS

© COLAS





L'ALBUM

L'HYDRO-ÉLECTRICITÉ A ENCORE DE BEAUX JOURS

G.T.S., dans la grande tradition des entreprises qui ont construit nos barrages de haute montagne, a bravé les multiples difficultés inhérentes aux travaux d'altitude en site montagneux et en conditions hivernales, pour remplacer une conduite de pompage sur le barrage pyrénéen d'Artouste, édifié en 1920 à 2 000 m d'altitude. Et c'est reparti pour un tour ! Vive la Houille Blanche !
(voir article page 64).



© PASCALLE DOARE

© G.T.S.

INTRODUIRE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DANS L'URBANISME

Les collectivités locales, les chercheurs et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie se sont réunis en colloques pour partager leurs expériences.

« // n'y a pas de titre "urbanisme" dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte (août 2015), a précisé Bruno Lechevin, président de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, lors des 3^e rencontres nationales de l'urbanisme durable⁽¹⁾. La loi en parle à travers la mobilité, le bâtiment et l'économie circulaire. »

Cette loi résulte d'un processus législatif continu, a rappelé Isabelle Saint-Pierre, chargée de mission à la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN, ministère du Logement). La loi SRU (2000) élargit l'échelle de planification urbaine à l'agglomération, et rapproche urbanisme et déplacements. La loi Grenelle 2 introduit le changement climatique, la biodiversité, la consommation d'espace et de ressources énergétiques, etc. Elle fixe des objectifs de réduction de gaz à effet de serre (GES). La loi Alur lutte contre l'étalement urbain. La loi

de transition énergétique ajoute la qualité de l'air, et évoque 42 mesures à intégrer dans les documents d'urbanisme⁽²⁾.

La convergence entre domaines impliqués dans la transition énergétique ne va pas de soi. « Les diagnostics sont plus une agrégation d'éléments à visée politique, a témoigné Frédéric Bossard, directeur de l'Agence d'urbanisme de la région de Saint-Étienne (Loire). Dans une collectivité territoriale, il faut refondre tous les thèmes des commissions spécialisées dans une commission spécifique tout en orientant les choix sur un point qui fait pencher la balance : l'économie, l'environnement, l'énergie, etc. »

Grenoble-Alpes Métropole a un référent "énergie-climat" par service. « Il existe différentes approches de la lutte contre les GES, on peut changer toute la flotte de véhicules ou modifier les trajets des agents, a proposé Jérôme Dutroncy, vice-président. Il faut une mobilisation large et

savoir remettre en question ce qui était prévu. »

→ **Cartographier l'énergie**

Dans l'agglomération de Lorient (Morbihan, 25 communes, 207 000 hab.), l'énergie fédère les documents d'urbanisme. La commission du Scot en cours d'élaboration, comprend un groupe de travail sur ce thème. De plus, un groupe technique réunit plusieurs fois par an les services énergie des communes ou l'élu qui s'en charge. Les efforts portent aujourd'hui sur la relocalisation de l'énergie pour atteindre 10 % de production locale grâce aux énergies renouvelables, associées à de l'auto consommation, aux réseaux de chaleur, au stockage, etc. « Nous disposons d'un outil de cartographie qui localise les consommations d'énergie, la production, les réseaux de distribution, et éventuellement croise ces données entre elles et avec celles sur les dépenses des ménages » explique Jean-Paul Aucher, conseiller délégué à l'énergie de l'agglomération. Ainsi, est-il possible d'identifier les secteurs prioritaires pour des travaux. Le réseau d'énergie



L'école Kermelo à Lorient (Morbihan) produit 40-60% de sa consommation d'électricité grâce à des capteurs solaires photovoltaïques et les consomme directement.

© JOSIANE GRANDCOLASVILLE DE LORIENT

d'un quartier où seront réalisées des économies d'énergie, n'aura peut-être pas besoin d'être renforcé.

→ **Être ambitieux**

« Il faut d'emblée être ambitieux dans les orientations des documents d'urbanisme, conseille Yann Wehring, directeur Est et Nord de l'action territoriale de l'Ademe. L'étalement urbain favorise les émissions de GES. » Dans ce domaine, « il faut recréer une centralité pour avoir un système de mobilité économe en énergie, a pointé Christophe Suchel, de la sous-direction de l'aménagement durable (DGALN). Le changement de mode de vie est consubstantiel de la transition énergétique. » ■

⁽¹⁾ 8 et 9 juin à Paris, organisées par l'Ademe et Le Moniteur.

⁽²⁾ Voir aussi *Climat et énergie*, 7^e cahier technique de l'AEU2, Ademe, 2015 ; *Planification et facteur 4*, Fédération nationale des agences d'urbanisme, 2015.

TERRITOIRE ET ÉNERGIE : UNE RELATION À CONSTRUIRE



Les collectivités territoriales autour de Lens (photo) et Liévin, Béthune et Hénin-Carvin (Pas-de-Calais) élaborent un schéma unique de cohérence territoriale qui prend en compte la transition énergétique sous l'angle énergie et emploi.

© LAURENT LAMACZ

Appliquer localement la loi de transition énergétique est un des objectifs du futur schéma de cohérence territoriale commun à l'arrondissement de Béthune, à l'agglomération de Lens-Liévin et à celle d'Hénin-Carvin (Pas-de-Calais, 650 000 habitants). La tâche est confiée à l'Agence d'urbanisme de l'Artois. Le Scot oriente les déplacements, l'économie, les continuités écologiques, la qualité de l'air, l'énergie, etc. Dans ce Scot, est prévue, par exemple, la création d'une filière commune des déchets aux 3 collectivités. But : produire de l'hydrogène à partir de la méthanisation et l'utiliser dans les piles à combustible des autobus. Un

moyen de créer des emplois dans un secteur à fort taux de chômage. Par ailleurs, sur ce même territoire, « un partenariat est lancé pour se doter d'une plate-forme qui modélise les documents de planification, a informé Pascal Van Acker, directeur de l'agence d'urbanisme intervenu au séminaire de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) sur la recherche et le développement au service de la transition énergétique⁽¹⁾. À partir d'un scénario, elle simule les conséquences sur dix-trente ans. »

Ce séminaire de l'Ademe a réuni plus de 200 chercheurs de toutes disciplines. Soixante-dix projets ont été présentés en

ateliers, autour de 5 parcours : urbanisme durable, bâtiment, énergies renouvelables (production, stockage, gestion), hydrogène, efficacité énergétique (industrie).

→ **Questions sociétales**

La relation entre territoire et énergie n'est pas évidente. « Aujourd'hui, nous tâtonnons pas mal, nous restons dans un régime d'expérimentation en permanence, comment en sortir ? » s'interroge François Menard, chargé de mission recherche au Plan urbanisme, construction et architecture, intervenant à la séance plénière sur les réseaux énergétiques. « Il faut organiser les deux niveaux de distribution, grands réseaux et éner-

gies renouvelables, recommande-t-il, faire appel à des systèmes robustes qui évitent l'accident intégral. Pour les collectivités, les questions d'énergie soulèvent des problèmes sociétaux fondamentaux. »

« Il y a un déficit en sciences humaines pour aborder la transition énergétique au niveau de la ville, » remarque Francis Allard, du Laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement.

En savoir plus sur :
<http://www.ademe.fr/urbanisme-durable-modelisation-evaluation-environnementales-sonores>. ■

⁽¹⁾ 17-18 mai, à Paris.

24 % DE L'ÉLECTRICITÉ CONSOMMÉE DANS LE MONDE EST RENOUVELABLE

Les énergies renouvelables productrices d'électricité continuent de progresser dans le monde. En 2015, leur puissance disponible s'élève à 1 849 GW, soit 29 % de la puissance électrique totale contre 27,7 % en 2014. Ainsi ont-elles pu fournir 23,7 % de la consommation (22 % en 2014). Ces chiffres incluent l'électricité hydraulique qui domine largement avec 1 064 GW. Sans elle, la puissance tombe à 785 GW (657 en 2014), selon Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (Ren21).⁽¹⁾

→ Éolien : le plus dynamique

Après l'hydraulique, vient l'électricité issue de la biomasse (bois, végétaux, biogaz, biocarburants), avec 464 GW installés. L'éolien, en 3^e place, dispose de 433 GW et le photovoltaïque, en 4^e, de 227. Ces deux énergies sont les plus dynamiques en 2015 avec 63 GW de plus pour la première, et 50 GW de plus pour la seconde.

→ Autres filières moins soutenues

L'intérêt pour l'électricité renouvelable s'explique en partie par le fait que



L'éolien progresse vite. Sur la photo, une des 21 éoliennes implantées à 250 km au nord de Shanghai (Chine).

1,2 milliard de personnes vivent sans électricité. « *Quelque 70 pays disposaient, à fin 2015, soit de capacités photovoltaïques hors réseau (national, NDLR), soit de programmes d'appui à ces installations, écrit Ren21. Plusieurs milliers de mini-réseaux étaient ainsi exploités dans le monde, notamment au Bangladesh,*

Cambodge, Inde, Chine, Maroc et Mali. » Les filières d'énergies renouvelables qui produisent de la chaleur, du froid et des biocarburants ont connu un moindre succès, à cause du prix bas du pétrole, selon REN21 mais aussi parce que « *l'appui politique au chauffage et au refroidissement renouvelables reste beaucoup plus timide que celui envers les autres secteurs (...) alors que le chauffage, seul, représente plus de la moitié de la consommation énergétique finale annuelle.* » Solutions : plus de formations, de campagnes de sensibilisation et d'incitations. En transport, le soutien politique « *reste à la traîne.* »

Enfin, signalons que 146 pays avaient adopté une politique d'efficacité énergétique en 2015.

En savoir plus sur :
www.ren21.net/gsr (en anglais). ■

⁽¹⁾ Réseau dirigé par un comité de 50 personnes, qui rassemble 700 experts et couvre 148 pays. Cf. *Travaux* octobre 2014 page 9, octobre 2015 page 8.

VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DU SOUS-SOL PROFOND

L'ouvrage Les filières industrielles de la valorisation énergétique du sous-sol profond met en évidence les points communs de l'exploration-production de pétrole, de la géothermie profonde et du stockage géologique d'hydrocarbures et de CO₂.

Il est publié dans la collection Prospective/Études et statistiques de la Direction générale des entreprises.

Le document téléchargeable de 192 pages analyse ce que les filières matures - pétrole, stockage d'hydrocarbures - peuvent apporter aux plus récentes comme la géothermie profonde, et ainsi accélérer leur développement à l'export, principal débouché.

BOUILLANTE TRIPLE DE PUISSANCE

La centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe) va tripler sa puissance électrique pour atteindre 45 MW en 2021. Coût : 10 millions d'euros.

Cet agrandissement est rendu possible par un protocole de financement signé début juillet et qui modifie les participations dans la centrale.

Ormat Technologies, entreprise de géothermie, prend 60 %, la Caisse des dépôts et consignations, 20 %, et Sageos (filiale BRGM) descend à 20 %.

La centrale produit actuellement 7 % de l'électricité consommée en Guadeloupe grâce à une eau à 250°C.

La montée en puissance contribue à l'autonomie énergétique de l'île envisagée pour 2030.



La centrale géothermique produit 7 % de l'électricité en Guadeloupe.

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE SE CONCRÉTISE

La loi de transition énergétique d'août 2015 se traduit en mesures et projets. L'énergie est bien représentée chez les lauréats de l'appel à manifestation d'intérêt "Ville et territoires durables", opéré par l'Agence nationale pour le renouvellement urbain (2015). Citons Saint-Denis de La Réunion qui étudie la faisabilité d'un réseau électrique local indépendant dans trois quartiers du littoral. Il sera alimenté par des énergies renouvelables associées à du stockage.

L'autonomie énergétique des îles - électricité solaire et stockage - a fait l'objet d'un appel d'offres dévoilé en juin :

52 MW⁽¹⁾ pourront produire 70 GWh par an en Corse, Guadeloupe, Martinique, Guyane et à La Réunion.

→ Installation sur le domaine public

Le regroupement de consommateurs, de producteurs et de collectivités sur un territoire est facilité par le décret n°2016-704 du 30 mai relatif aux expérimentations de services de flexibilité locaux sur des portions du réseau public de distribution d'électricité, mesure favorable aux renouvelables.

L'ordonnance sur la sécurité des ouvrages de transport et distribution simplifie l'installation sur le domaine public de

canalisations comme celles de raccordement du biométhane au réseau.

Trois projets ont été retenus dans le cadre de l'appel "réseaux électriques intelligents", en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Bretagne et Pays-de-la-Loire, et Nord/Pas-de-Calais/Picardie.

Ces réseaux contribuent aux économies d'énergie et au pilotage de la consommation chez le consommateur.

→ Auto consommation collective

L'électricité renouvelable consommée sur place bénéficie de plusieurs décisions. Le compteur Linky enregistrera, en 2017, les kilowattheures consommés et ceux injectés là où il faut actuellement un second compteur. L'ordonnance du 28 juillet introduit la notion d'auto consommation collective. Plusieurs producteurs ou consommateurs se raccordent à une même antenne basse tension du réseau public, avec un tarif spécial. S'ils injectent de petites productions dans le réseau, il n'y aura pas d'obligation d'être rattaché à un périmètre d'équilibre. ■



Les îles visent l'autonomie énergétique. Ici, installation de 471 kWc à La Réunion.

⁽¹⁾ Hors liste complémentaire (+ 13 MW).

ENTRETIEN DES MURS DE SOUTÈNEMENT

Le Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures, la Fédération nationale des travaux publics et l'association Ingénierie de maintenance du génie civil publient le Carnet d'entretien des ouvrages de génie civil, n°2 les murs de soutènement, à destination des maires.

Téléchargeable sur : www.imgc.fr.

RECHERCHES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

L'Institut photovoltaïque d'Île-de-France accueillera 150 chercheurs en 2017.

La construction de la 1^{re} phase de 7 800 m² a commencé sur le campus de Paris-Saclay, dans le quartier de l'École polytechnique à Palaiseau (Essonne).

L'IPVF sera consacré aux dispositifs d'énergie solaire photovoltaïque de nouvelle génération. Il est fondé par EDF, Total, le CNRS, Polytechnique, Air Liquide, Horiba Jobin Yvon et Riber. Architecte : Jean-Philippe Pargade. Construction : Demathieu et Bard.



© PARGADE ARCHITECTE

Intérieur de l'Institut photovoltaïque.

VÉGÉTAUX ENVAHISSANTS

Les mauvaises herbes vont à l'encontre de la biodiversité quand elles sont envahissantes comme certaines espèces exotiques.

La FNTP publie un guide pratique pour ne pas contribuer à leur propagation à l'occasion d'un chantier.

LA SEINE CONVOITÉE PAR CINQ DÉPARTEMENTS



© ALAN AUBRY/CD SEINE-MARITIME

Les voies cyclables interdépartementales vont se développer. Ici, piste à Forges-les-Eaux (Seine-Maritime).

« Nous allons construire une offre commune de croisière fluviale », a indiqué Sébastien Lecomu, président d'Axe Seine, association qui regroupe depuis le 7 juillet, cinq départements traversés par le fleuve : Seine-Maritime, Eure, Hauts-de-Seine, Val-d'Oise, Yvelines⁽¹⁾. « La navigation fluviale est un vrai sujet qui nous réunit, c'est l'axe de travail commun le plus évident », a ajouté Patrick Devedjian, président du Conseil départemental (CD) des Hauts-de-Seine. Le département est le bon échelon pour faire de la Seine le terreau du développement économique. Les ports ne sont pas assez internationaux, le tourisme, pas assez développé. »

La volonté d'unir les collectivités baignées par la Seine n'est pas nouvelle. « Pour investir tous ensemble, il faut assouplir les frontières entre départements, l'association en est le meilleur outil », estime Sébastien Lecomu, également président du CD de l'Eure.

Axe Seine est ouverte à des partenaires, en premier lieu, le Calvados dont le port

de Honfleur borde l'estuaire de la Seine. Paris n'en fait pas partie. L'amont de Paris - l'Essonne et la Seine-et-Marne - n'est pas ignoré et s'intéresse à la démarche.

Les membres d'Axe Seine veulent peser dans le débat. « Nous voulons exister avec une masse critique face à Paris et pour engager le dialogue avec elle », a assuré Arnaud Bazin, président du CD du Val-d'Oise. Ils veulent également s'adresser à l'État « d'une seule et même voix. La compétence sur l'organisation sur le fleuve est complètement éclatée et l'État n'a pas de politique directrice », a souligné Patrick Devedjian.

Voies navigables de France, gestionnaire du réseau pour l'État, est pressenti comme partenaire ainsi que Haropa, GIE qui réunit les ports du Havre, de Rouen et Paris.

→ Aménager des quais de croisière

L'association n'a pas de budget propre. En effet, ces centres d'intérêt correspondent à des orientations du Schéma stratégique pour l'aménagement et le déve-

loppement de la Vallée de Seine pour 2030 mis en œuvre dans le Contrat de plan interrégional État-régions (Basse et Haute-Normandie, et Île-de-France) 2015-2020.

L'offre de croisière fluviale - action la plus avancée - viendra compléter celle des compagnies étrangères qui attirent déjà 63 000 passagers (2014), une fréquentation en hausse. Cela suppose de multiplier les quais aménagés pour ces bateaux, plus larges et plus longs que les péniches, et qui ont besoin d'eau, d'énergie, d'évacuer leurs déchets. Ainsi les escales pourront-elles être plus nombreuses.

Deuxième piste : les liaisons douces avec, par exemple, une véloroute "la Seine à vélo", à créer en concertation. L'Eure et la Seine-Maritime sont chefs de file.

Autre point essentiel aux yeux d'Axe Seine : le marketing territorial, du ressort des collectivités. Il mettra en avant l'identité, la culture, l'histoire.

→ Réinventer le fleuve

Enfin, le développement économique a sa place à travers l'aménagement de friches et leur impact sur l'emploi. L'appel à projets "Réinventer la Seine" invite architectes, entrepreneurs, artistes, à innover sur différents sites au bord de l'eau. Il est reconduit chaque année jusqu'à 2020.

Axe Seine veut aussi se faire connaître du grand public. « La Seine sera le fil rouge d'un grand événement du 23 au 25 juin 2017 », a annoncé Pascal Martin, président du CD de Seine-Maritime qui le pilote. ■

⁽¹⁾ Haropa, GIE des trois grands ports sur la Seine, parle aussi d'Axe Seine pour la logistique sur le fleuve. Normandie Axe-Seine est une société publique locale chargée d'un schéma directeur d'aménagement des berges de la Seine à Vernon (Eure).



Port de Nanterre (Hauts-de-Seine), peu connu et à développer.

© JEAN-LUC DOLMAIRE/CD HAUTS-DE-SEINE

LA CIOTAT REVALORISE SA GRANDE FORME



© NGE

Au centre de la photo, le mur rainure de 3,50 m d'épaisseur grâce auquel le bateau-porte peut être manœuvré dans sa seconde position, et la station de pompage derrière.

Le grand bassin de réparation de bateaux du Chantier naval de La Ciotat (Bouches-du-Rhône) est en rénovation et sera remis en service fin 2016. Cette grande forme - 335 m de long par 60 de large et 9 de profondeur - peut désormais être coupée en deux. Le premier tiers, proche de la mer, peut rester en eau, et des yachts s'y amarrer.

Les autres deux tiers se vident et abritent d'autres yachts, à réparer ou à rénover. Le chantier naval se prépare ainsi à accueillir de tels bateaux jusqu'à 180-200 m au lieu de 80-130 m jusqu'à présent. Les équipages continuant de vivre à bord pendant l'entretien, il faut prévoir la fourniture en eau, énergie et communications.

L'accueil des super et méga yachts vise à accroître l'activité du chantier naval repris en 1995 par la Société d'économie mixte de développement économique et portuaire (Semidep)⁽¹⁾. Le site de 34 hectares avait été fermé en 1988 quand il appartenait aux Chantiers navals de la Ciotat (CNC). Plus de 200 navires étaient sortis de ses cales en quarante ans. Les pétroliers y occupaient toute la longueur de la forme. Avec les yachts, plus petits, la Semidep a pu envisager de la scinder en deux et d'offrir de l'amarrage.

Le bateau-porte qui ferme le bassin et permet de l'assécher pour y travailler, a dû être changé, faute d'entretien. Le nouveau aura désormais deux positions : une en bord de mer - si la forme est utilisée dans toute sa longueur - et l'autre à 135 m de ce bord. Pour le manœuvrer à l'intérieur du bassin et le positionner dans ses encoches à l'intérieur, il a fallu élargir la forme de quelques mètres et la doter d'un mur rainure. Celui-ci mesure 3,50 m d'épaisseur en béton plein, 26 m de long et 9,70 de haut. L'épaisseur se justifie par la recherche d'étanchéité. Le ferrailage répond aux exigences des Eurocodes. Les parois existantes de la grande forme, construite en 1967-1968, font elles aussi 3,50 m d'épaisseur mais sans ferrailage. Elles n'ont pas souffert, selon NGE Génie Civil, mandataire du groupement d'entreprises chargé d'une partie du chantier⁽²⁾.

→ Station de pompage

Un côté de la forme, constitué de gros blocs de béton de 3,50 m d'épaisseur, de 2-3 m de haut et 4-6,50 m de long, sera rejointoyé. La plate-forme au-dessus est recomposée à l'aiguille vibrante par GTS.

Une station de pompage a été implantée près de la seconde position du bateau-

porte. Elle sert à vider le bassin sur 200 m, une fois le bateau-porte en place à 135 m du bord de mer. Ses murs mesurent 1,50 m d'épaisseur.

Ces travaux qui "entament" un côté de la grande forme, ont nécessité de consolider la palplanche de bordure, par jet grouting sur 65 m de long et 9 m de profondeur, jusqu'à la couche de grès.

→ 16 millions d'euros

Le réaménagement du bassin de réparation coûte 16 millions d'euros HT dont 5,7 pour NGE, 4,5 pour le bateau-porte (Paimbœuf/Joseph Paris), 1,55 pour les pompes (Société des eaux de Marseille) et 600 000 euros en électricité (Spie Sud-Est).

Rappelons qu'un bateau-porte est maintenu en place par l'eau dont il est rempli puis par la mer qui le plaque en position. Pour être déplacé, il est vidé, l'air remplace l'eau, ce qui le fait flotter.

Au repositionnement, il est de nouveau rempli d'eau par un système à air comprimé. ■

⁽¹⁾ Société anonyme publique. Actionnaires : département des Bouches-du-Rhône (50 %), Région (25,82 %), La Ciotat (4,27 %), MPM (19,91 %).

⁽²⁾ Composé de NGE Génie Civil, Guintoli (terrassements, remblaiements), EHTP (canalisations) et Ineo (électricité bâtiment).

LE GYPSE EN ÎLE-DE-FRANCE

L'analyse des phénomènes géologiques liés au gypse en Île-de-France fait l'objet d'une convention de recherche signée début juillet entre la Société du Grand Paris, le Cerema et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques.

Ce partenariat de quatre ans vise à mieux connaître ces mécanismes naturels présents notamment dans le parcours nord-est du futur Grand Paris Express.

ÉOLIENNE FLOTTANTE EN 2017

La construction de la première éolienne flottante vient de commencer à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). Conçue par Ideol et baptisée Floatgen, elle est portée par un consortium européen de sept industriels et organismes de recherche.

Elle sera installée au large du Croisic sur le site d'essais Sem-Rev de l'École centrale de Nantes, opéré avec le CNRS. Objectif : démontrer le potentiel de l'éolien flottant.

La coque de béton est construite par Bouygues Travaux Publics, et la société Le Béton fournit le système d'ancrage. L'éolienne de 2 MW sera assemblée à quai puis remorquée en mer et connectée au réseau électrique en 2017.

* Cf. Travaux avril-mai 2015, page 10.



© IDEOL

Vue simulée de l'éolienne Floatgen, à flotter en béton.

EXTENSION DU TRAM À BIRMINGHAM

Colas Rail Ltd fait partie de l'alliance chargée des études, achats, construction et mise en service de l'extension du réseau de tramway de l'agglomération de Birmingham (Angleterre), signée pour dix ans.

La filiale du groupe Colas reçoit 60% du contrat total de 1,2 milliard de livres (1,44 milliard d'euros/juillet) pour réaliser des extensions et des composantes du système de transport ainsi que les aménagements urbains, le bâtiment et le génie civil.

BRUIT, VIBRATIONS, AIR

Soldata Ltd a été désignée conseil en environnement, bruit, vibrations et qualité de l'air pour les six chantiers du projet Thames Tideway à Londres.

La construction de 25 km de tunnels et de cinq grands puits pour évacuer des eaux usées non traitées - travaux sur sept ans - a été confiée à une joint-venture avec Costain, Vinci Construction Grands Projets et Soletanche Bachy.

STADE DE RUGBY COUVERT

Le Grand stade de rugby verra le jour à Ris-Orangis (Essonne) en 2021-2022. La Fédération française de rugby a confié la conception, la construction et la maintenance au groupement Ibelys formé d'Icade (immobilier), Besix (construction) et Engie (maintenance). Le stade pourra accueillir 82 000 personnes, sera doté d'un toit rétractable et d'une pelouse amovible. Son coût est estimé à 581 millions d'euros. Les travaux commencent en 2018.

FRANCHISSEMENT DE VOIES FERRÉES À SAINT-DENIS



© AGENCE MARC MIMRAM

Vue du pont et de la passerelle, lieux animés, au-dessus des 300 m de voies ferrées.

La maîtrise d'œuvre du franchissement des voies ferrées à Saint-Denis (Seine-Saint-Denis) est confiée au groupe mené par l'architecte Marc Mimram. Un pont et une passerelle vont relier le quartier Pleyel à celui du Landy, actuellement séparés par un faisceau de voies ferrées venant de la Gare du Nord, de 300 m de large.

Ces ouvrages sont indispensables pour créer un pôle de correspondance entre le RER D, la ligne de métro 14 et les futures lignes 15-16 et 17 du Grand Paris Express (GPE).

Ils seront construits en même temps que la nouvelle gare Saint-Denis-Pleyel du GPE qui devrait ouvrir en 2023. « Le franchissement urbain Pleyel ne doit

pas se réduire à une liaison fonctionnelle mais doit devenir un morceau de ville, écrit l'Établissement public territorial Plaine Commune⁽¹⁾. Il permettra la poursuite de l'effort de construction de logements de Plaine Commune, contractualisé avec l'État, et la densification de la première couronne parisienne. »

→ Lieu habité

Le projet Mimram, désigné officiellement le 30 septembre par le Conseil du territoire de Plaine Commune, ne sera pas qu'un lieu de transit. Il comprendra un espace habité avec une vue dégagée sur l'horizon par « le fleuve ferroviaire », selon Marc Mimram.

Le coût de la passerelle et du pont routier de 300 m de long a été estimé à 95 millions d'euros, hors parties habitées.

→ Atout pour les JO

Ce chantier est d'autant plus important qu'il fait partie des atouts de Paris pour sa candidature aux jeux olympiques de 2024. Sans ce franchissement, les équipements sportifs - Stade de France et futur centre aquatique - seraient séparés du village olympique, à construire de l'autre côté des voies. ■

⁽¹⁾ Aubervilliers, Épinay-sur-Seine, l'Île-Saint-Denis, La Courneuve, Pierrefitte-sur-Seine, Saint-Denis, Saint-Ouen, Stains, Villetaneuse.

LE PALAIS DE JUSTICE DE PARIS S'INSCRIT DANS LE PAYSAGE

Le gros œuvre du nouveau palais de justice de Paris s'est terminé cet été. Commencé au 1^{er} semestre 2015, il a été confié à Bouygues Bâtiment Île-de-France par la société de projet Arélia (partenariat public privé). Le bâtiment, situé dans la zone d'aménagement concerté des Batignolles (Paris 17^e), doit ouvrir en juin 2017. Il accueillera, de façon plus rationnelle que le palais actuel à Paris 1^{er}, le tribunal de grande instance, les tribunaux d'instance et le tribunal de police.

L'immeuble de grande hauteur - 160 m et 38 étages - se compose de trois parallélépipèdes superposés reliés par des "tailles de guêpes" aux 9^e, 19^e et 29^e niveaux.

Ces étranglements signalent la présence de noyaux, un pour chaque bloc sur toute la hauteur.

Les noyaux les plus hauts - ceux des deux bâtiments supérieurs - ont été réalisés en coffrage glissant, au rythme de 20 cm de noyau par heure, soit un étage tous les deux jours, grâce au coulage du béton en continu.

→ Béton sur mesure

Le béton a été fourni par Eqiom après essais et simulation en laboratoire et sur site, avec Bouygues Construction.

Le béton haute performance retenu répond aux contraintes de fluage et aux caractéristiques recherchées en résistance mécanique, montée en température et retrait, durée pratique d'utilisation, comportement en coffrage, pompabilité et aspect de surface.

Bouygues Bâtiment poursuit le chantier, en particulier avec la pose des façades et l'aménagement des terrasses situées aux niveaux 19 et 29. ■



© LAURENT BLOSSIER

Deux noyaux de l'immeuble de grande hauteur ont été réalisés en coffrage glissant.

MISE EN SERVICE DE LA CENTRALE GÉOTHERMIQUE POUR ROQUETTE



© ÉLECTRICITÉ DE STRASBOURG

La centrale est située à 15 km de l'utilisateur industriel.

La centrale géothermique qui alimente en vapeur l'usine Roquette (Bas-Rhin) est entrée en service en juin après quatre ans de travaux⁽¹⁾. De l'eau à 170°C alimente une boucle de chaleur à 155°C. La puissance thermique disponible est de 24 MW capable de produire 190 000 MWh de chaleur par an, de façon constante. Particularité de cette installation : elle est éloignée de

15 km de l'utilisateur, transformateur de matières végétales. En effet, au droit de l'usine, il aurait fallu creuser à 6 000 m de profondeur pour accéder à une telle température. L'eau chaude est donc extraite à Rittershoffen par un puits descendant à 2 500 m. Elle est acheminée par une canalisation enfouie à 1,50 m et isolée sur les 15 km qui la séparent de Beinheim où se situe Roquette.

La vapeur d'eau ne perd que 5°C pendant le transport. Le forage et le 1^{er} échangeur à la centrale soustraient 10°C. Après avoir livré la chaleur dans l'usine, l'eau repart à 70°C vers le second puits, à 15 km. Elle rejoint le milieu naturel à plus d'un kilomètre de distance en biais du pied du premier forage et à 2 500 m de profondeur pour se réchauffer.

→ Garanties Ademe et Région

Le projet qui remonte à 2006, a été porté par Roquette, Électricité de Strasbourg (filiale d'EDF) et la Caisse des dépôts. Le Fonds chaleur, géré par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, verse une subvention de 25 millions d'euros sur le total de 55 millions. De plus, l'Ademe se porte garante à hauteur de 13 millions pour couvrir le risque d'insuffisance de la ressource, garantie complétée par celle de la région Alsace-Champagne Ardenne-Lorraine jusqu'à 2 millions d'euros. ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* mars 2012 n°887, page 15, et septembre 2014 n°908, page 10.

LES IMMEUBLES EN BOIS FLEURISSENT



© JEAN-PAUL VIGUIER

Tour Hyperion de 57 m de haut, en projet à Bordeaux.

C'est à qui construira le plus haut bâtiment en bois. En réalité, il s'agit le plus souvent d'une structure mixte bois et béton⁽¹⁾.

Citons la tour Hyperion dans le quartier Euratlantique à Bordeaux, de 57 m de haut, à noyau central en béton complété par une ossature poteaux-poutres en lamellé-collé. La tour du bailleur social Clairisienne sera construite par Eiffage Construction entre 2018 et 2020. En tant que lauréate de l'appel à projets "démonstrateurs industriels pour la ville durable", elle reçoit une aide des Investissements d'avenir.

Un îlot voisin accueillera deux autres tours en bois de 50 m (projet Sylva de Kaufman & Broad).

→ 900 tonnes de bois

À Nice, le Palazzo Méridia montera à 35 m en 2018 dans la technopole située dans la plaine du Var. Plus modeste avec 9 étages, sa structure est en béton associée à des murs et planchers en contreplaqué, et des poteaux-poutres en lamellé-collé, ce qui représente une commande de 900 tonnes de bois français. De plus, l'immeuble sera à énergie positive grâce à son raccordement au réseau géothermique (production de froid et de chaud) et des capteurs photovoltaïques.

→ Une structure façade-toiture

Le centre sportif de 5 200 m² construit à Clamart (Hauts-de-Seine) est en bois contreplaqué avec la particularité que façade et toiture forment une structure continue. Les poutres transversales mesurent 40 m et ont une portée jusqu'à 30 m. Son architecture a été imaginée par l'Agence Gaëtan Le Penhuel. ■

⁽¹⁾ Voir aussi "Tour en bois de 84 m en Autriche", *Travaux* juillet-août 2015 n°916, page 12.



© MEETSANWOOD

Structure de façade et de toiture en contreplaqué dans ce centre sportif de Clamart (Hauts-de-Seine).

BÂTIMENTS EN BRIQUES

Le 2^e prix du concours construction en briques de Wienerberger, catégorie Spécial Solution, a été attribué à un immeuble de six étages dont les façades sont des murs creux de 76 cm d'épaisseur. L'air circule naturellement à l'intérieur des parois en briques, ce qui élimine tout système de ventilation, chauffage ou refroidissement. Le bâtiment du cabinet d'architecture autrichien Baumschlager Eberle Lustenau s'appelle 2226, signalant la température intérieure de 22-26°C toute l'année.

Parmi les six projets couronnés, mentionnons également le mur extérieur tout en rondouze de l'auditorium AZ Groeninge en Belgique. Il est constitué de briques disposées verticalement.



© EDUARD HUEBER

L'air se réchauffe et se refroidit en circulant dans la façade creuse.

ACCÈS SIMPLIFIÉ AUX DONNÉES GÉOGRAPHIQUES

Le logiciel 1Spatial donne accès simplement et gratuitement aux bases de données géospaciales. Il s'agit d'une version allégée du système d'information géographique Elyx 3D.

« C'est une passerelle supplémentaire entre bureaux d'études, architectes, entreprises et collectivités pour une mutualisation de leurs données en 3D, basée sur des standards d'interopérabilité, écrit 1Spatial. Il est capable de lire et d'agrèger des données CityGML et tout fichier vectoriel ou de scène. »

CHEMINS LUMINEUX

Aco, fabricant de caniveaux de chaussée, propose trois modèles de couverture à points lumineux.

La grille Lighpoint, en fonte, comporte une lampe led de 4 cm de diamètre (0,6 W) sur chaque morceau de 50 cm sur 100 ou 200 mm de large (résistance mécanique D400). L'Eyeled (photo), en composite, est moins résistante au trafic (véhicules légers, classe B125). Disponible en 50 cm sur 100 mm, elle est équipée d'une led de 2 cm (0,3 W).

Enfin, la Sideline, couverture à fente et barrette lumineuse, dessine une ligne de couleur sur le sol.



Caniveau recouvert d'une grille en composite à leds.

SCANNER DE ROUTE

Smoothride, scanner embarqué sur véhicule, enregistre la surface de la route sous forme d'un nuage de points, et ceci à très grande vitesse, selon Topcon.

Cette analyse permet de régler le travail du finisseur ou de la raboteuse, auxquelles elle peut être transmise. Ainsi, la quantité de matériaux à apporter sur la chaussée ou à enlever est-elle estimée au plus juste.



L'état de la chaussée est transmis aux engins routiers.

LA NORME FILTRATION ET DRAINAGE PAR GÉOSYNTHÉTIQUE EST RÉVISÉE



Drainage, filtration, semi-imperméabilisation d'un stockage de déchets en Martinique.

La norme sur les systèmes de filtration et de drainage par géosynthétiques a été révisée. La nouvelle version, publiée par l'Afnor en août 2016, s'intitule "Utilisation des géotextiles et produits apparentés - systèmes de drainage et de filtration - dimensionnement et éléments de conception" ou NF G 38061.

Le nouveau texte est plus didactique et plus riche. Le dimensionnement est plus élaboré, il s'accompagne d'exemples très détaillés. La partie mise en œuvre est plus importante.

« La norme NF G 38061 était devenue obsolète, indique Alain Hérault, responsable technique chez Low & Bonar, qui a contribué à sa révision à l'Afnor. Elle devait intégrer les normes d'essais européennes et Iso actuelles. Elle s'appuie sur les Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration du Comité français des géosynthétiques (2013-2014), et contribue à l'élaboration du guide Iso/TR 18228 relatif au dimensionnement des géosynthétiques. La nouvelle norme prend en compte les mêmes phénomènes mais les exprime avec d'autres grandeurs physiques, d'où la nécessité d'adapter les règles de dimensionnement. »

→ Conditions d'essais selon l'ouvrage

L'ancienne permittivité devient "perméabilité à l'eau normale (perpendiculaire) au plan du géosynthétique" qui supprime le rapport à l'épaisseur du matériau. La transmissivité - relative à l'écoulement de l'eau dans le plan, horizontal ou vertical - devient "capacité de débit dans le

plan" qui exprime plus clairement le débit réellement évacué par le produit.

Deux exemples de dimensionnement d'un géotextile en filtration sont développés dans l'annexe A : en tranchée drainante et sous enrochement en protection contre l'érosion de berge.

La partie drainage de la norme établit les relations entre les conditions d'utilisation d'un produit et certaines conditions d'essais à requérir. Elle fournit la liste exhaustive des paramètres du dimensionnement autour des caractéristiques de l'ouvrage et de son exploitation. « Selon l'ouvrage et l'utilisation du produit dans l'ouvrage, les conditions d'essais, en particulier sur la capacité de débit dans le plan, ne seront pas les mêmes, explique Alain Hérault. Le document aide à estimer les débits à évacuer pour des cas courants, ce que ne faisait pas celui de 1993. Il les exprime notamment en fonction de la

perméabilité des terrains et du taux de ruissellement dont l'annexe B fournit des ordres de grandeur. »

Autre nouveauté : les hypothèses de calcul relatives à la charge hydraulique admissible selon que l'écoulement est gravitaire ou en charge.

→ Capacité de drainage à court et long terme

Les performances de capacité de débit dans le plan (drainage) sont désormais envisagées à court et long terme, là où on se contentait d'un coefficient de sécurité pour couvrir les incertitudes.

La nécessité de vérifier la tenue mécanique des produits lorsqu'ils sont soumis à la traction (cf. NF G 38067), est rappelée. L'annexe C présente des dimensionnements de dispositifs de drainage granulaires et géosynthétiques subhorizontaux (hors talus) pour les comparer au cas par cas. ■



Géocomposite de drainage en masque drainant, confortement des digues d'Arles (Bouches-du-Rhône).



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

Par mail : sur 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



TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 927 « Ville et patrimoine »
- TRAVAUX n° 928 « International »
- TRAVAUX n° 929 « Gares et stations »

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 :

Bertrand COSSON

Tél. 01 42 21 89 04

b.cosson@rive-media.fr



Carine REININGER

Tél. 01 42 21 89 05

c.reininger@rive-media.fr

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 11 ET 12 OCTOBRE

Maintenance des ouvrages de génie civil en Europe

Lieu : Toulouse

www.le-pont.com

• 8 ET 9 NOVEMBRE

Intelligent building systems

Lieu : Paris (Porte de Versailles)

www.ibs-event.com

• 8 ET 9 NOVEMBRE

Meeting Bim 2016

Lieu : Paris 1^{er}

www.lemoniteur.fr

• 8 AU 11 NOVEMBRE

6^e conférence asiatique sur les géosynthétiques

Lieu : New-Delhi (Inde)

www.cfg.asso.fr/igs-india

• 14 ET 15 DÉCEMBRE

Energaia, forum énergies renouvelables

Lieu : Montpellier

www.energaia.fr

FORMATIONS

• 3 ET 4 OCTOBRE

Politique territoriale de gestion des eaux pluviales

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

• 5 OCTOBRE

Réhabilitation énergétique : solutions pour bâtiments tertiaires

Lieu : Paris

<http://formation-continue.enpc.fr>

• 22 AU 25 NOVEMBRE

Méthodologie de montage de grands parcs éoliens

Lieu : Bonneval (Eure-et-Loir)

www.metrol.fr

• 7 ET 8 DÉCEMBRE

Potentiel éolien et risques associés

Lieu : Paris

www.metrol.fr

NOMINATIONS

ANRU :

Franck Caro qui a intégré l'EPA Paris Saclay, est remplacé par Caroline Bollini à la direction de la stratégie et de l'accompagnement des acteurs de l'Agence nationale pour la rénovation urbaine. Sarah Lacoche succède à Laurent Doré à la direction de l'administration, des finances et des systèmes d'information.

APPRENTISSAGE :

Jean-Christophe Repon a été élu président du Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du bâtiment et des travaux publics (CCCA-BTP, formation initiale) en juin, à la suite d'Armand Suardi, après avoir été, en mai, également élu à la tête de Constructys (formation continue).

ARAFER :

Bernard Roman préside désormais l'Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières. Il remplace Pierre Cardo.

ASFA :

Jean Mesqui a été nommé président de l'Association professionnelle des sociétés françaises concessionnaires d'autoroutes après en avoir été le délégué général. Il succède à Pierre Coppey.

AZUR DRÔNES :

Jean-Marc Crépin est directeur général chargé des finances et du développement.

EGF BTP :

L'organisation professionnelle des Entreprises générales de France est désormais présidée par Max Roche, à la suite de Laurent Grall.

ENVIRONNEMENT ET LOGEMENT :

Régine Engström est nommée secrétaire générale, commissaire aux transports et aux travaux publics et de bâtiment, chargée des relations internationales sur le climat pour les ministères de l'Environnement et du Logement.

EQIOM :

Roberto Huet prend la relève de Gérard Letellier au poste de directeur général d'Eqiom (Holcim-France repris par CRH en 2015). La présidence qu'il occupait au Centre d'information sur le ciment et ses applications (Cimbéton), est désormais entre les mains de Grégoire Douillet.

FIEC :

Jean-Louis Marchand préside la Fédération de l'industrie européenne de la construction, après en avoir été vice-président (économie).

GRAND PARIS :

Vianney Elzière succède à Brigitte Grégoire à la direction de projet de la ligne 18 (aéroport d'Orly-Ver-sailles) du Grand Paris Express, à la Société du Grand Paris.

INDUSTRIE ROUTIÈRE :

Robert Bello prend la suite de Philippe Bisi à la présidence du Syndicat professionnel régional de l'industrie routière en Île-de-France.

LOGEMENT :

Alain Jund est chargé par le ministre du Logement d'une mission

pour renouveler le label Écoquartier.

PARIS SACLAY :

Franck Caro est directeur général adjoint chargé de l'aménagement de l'Établissement public d'aménagement de Paris-Saclay (Essonne).

SFCE :

Gabriel Staniul est le nouveau responsable technique du Syndicat français de l'échafaudage, du coffrage et de l'étalement. Il prend la suite de Mathieu Monteil.

SOCOTEC :

Gérard Rousseau a été nommé directeur industrie au sein de la division International et Industrie du groupe. Il succède à Jean-Jacques Disetti.

TRANSPORTS :

Jacques Legaigoux remplace Radia Ouarti au poste de conseiller auprès du secrétaire d'État aux Transports, chargé du routier, de l'urbain et de la mobilité durable.

URBANISME :

Pascal Van Acker, directeur de l'Agence d'urbanisme de l'Artois, part en retraite. Il est remplacé par Carole Bogaert qui était directrice adjointe.

VINCI :

Pierre Coppey devient directeur général adjoint chargé des synergies opérationnelles en France et à l'international du groupe, tout en restant à la tête de Vinci Autoroutes et de Vinci Stadium. Richard Francioli est nommé directeur général adjoint Contracting et Christian Labeyrie, directeur général adjoint finances. Nicolas Notebaert devient le directeur général de Vinci Concessions.

Par arrêt du 22 mai 2014, la 9^e chambre correctionnelle de la Cour d'appel de Versailles a reconnu la société Bouygues travaux publics et son délégataire de pouvoir coupables, malgré l'avertissement que leur avait donné l'inspection du travail, du défaut d'information sur l'interdiction d'utiliser les échelles pour les manœuvres intervenant sur le chantier de Triel-sur-Seine et ayant involontairement entraîné le 19 juillet 2009 le sectionnement d'un doigt pour un salarié. En répression, ils ont été condamnés aux peines d'amende de 30 000 euros pour la société et de 3 000 euros pour le délégataire de pouvoir.

Réforme territoriale, regroupement des régions et loi NOTRe : quel impact sur les compétences eau et assainissement ?



Alain Grizaud,
président de
Canalisateurs
de France

La mobilisation de Canalisateurs de France vers les élus pour conjurer le climat d'attentisme

L'attentisme dans lequel se trouvent la plupart des collectivités et syndicats est la cause majeure de la faible activité. La plupart des réponses aux questions induites par la loi NOTRe : quels seront les contours des EPCI ? qui aura la compétence eau et assainissement ? Elles sont sans réponse dans la plupart des territoires. Cet "effet tunnel" risque de durer a minima 2 ou 3 ans, luxe que ne peuvent se payer les entreprises du secteur.

Sur certains territoires, les services s'organisent et on peut espérer que le descriptif détaillé des réseaux d'eau et d'assainissement ainsi que le plan d'actions en cas de rendement inférieur au seuil ouvrent la voie à de l'activité pour les entreprises. Certaines collectivités prennent, malgré tout, les devants en anticipant les appels à projets développés dans les Agences de l'eau. Les prêts dont peuvent bénéficier les collectivités devraient aussi pouvoir limiter la décroissance.

Pour accélérer le retour à la croissance, les délégations régionales de Canalisateurs de France continuent à aller à la rencontre des élus pour leur rappeler l'importance de l'investissement et de l'entretien de ce patrimoine précieux.

Mobiliser les collectivités, en refusant le discours ambiant de pessimisme sur l'investissement, est aujourd'hui primordial pour se projeter sereinement dans l'avenir. Les financements existent et sont disponibles. Les 6 Agences de l'eau ont eu pour mot d'ordre de lutter plus efficacement contre les réseaux fuyards, notamment via des appels à projets. Parallèlement, dans le cadre des révisions à mi-parcours des X^e programmes d'intervention, certains taux d'aides pour les travaux de réparation et renouvellement des réseaux ont été bonifiés.

De plus, la baisse des dotations de l'État ne devrait pas être opposée aux demandes d'investissement, car elle n'impacte pas, en principe, les services d'eau et d'assainissement qui sont en budget annexe.

Ainsi, l'urgence des Canalisateurs est bien de changer l'état d'esprit des élus, de les informer et d'être suffisamment pédagogues pour les aider à se repérer dans la jungle des financements et des subventions, afin qu'ils favorisent à nouveau leurs investissements sur les travaux.

Loi NOTRe : mise en œuvre et conséquences pour les services d'eau et d'assainissement

À l'échéance 2020, les compétences eau et assainissement seront obligatoirement transférées aux intercommunalités à fiscalité propre (EPCI - FP). Toutefois, les syndicats qui chevauchent au moins trois EPCI pourront garder leurs compétences, sauf à ce que l'un des 3 EPCI exerce son droit de retrait dans le délai d'un an prévu par la loi et que ce retrait soit validé notamment par le Préfet ou bien qu'il soit démantelé avant le transfert obligatoire des compétences. Cette réforme signe aussi la fin de la gestion communale de l'eau potable.

La loi NOTRe est néanmoins l'argument clef utilisé par les collectivités pour ne pas investir, au prétexte de ne pas savoir ce qu'elles deviendront demain.

La position de Canalisateurs de France est de rationaliser la gestion de l'eau, en supprimant notamment la notion de commune isolée en tant que gestionnaire d'un service de l'eau. Pour mémoire, la France compte 31 000 services : 14 000 services de l'eau et 17 000 services de l'assainissement. Cette démarche devrait permettre une gestion plus efficiente.

Rester attentif à ce que les collectivités distributrices ou en charge de l'assainissement rencontrant des difficultés structurelles soient associées à des structures saines et que l'ensemble ainsi formé dispose des ressources suffisantes pour maintenir en parfait état de fonctionnement les réseaux de distribution et d'assainissement.

Il est de fait indispensable de surveiller les schémas (SDCI) élaborés par les préfets pour vérifier que les problématiques de l'eau et de l'assainissement sont prises en compte de manière correcte. Il faut veiller à ce que les propositions des préfets ne déstabilisent pas des structures existantes fonctionnant de manière efficiente ou mettent en difficulté des collectivités par des regroupements non pertinents.

Il apparaîtrait hasardeux de revenir sur l'existence des syndicats dont la politique permet une gestion saine de leur réseau. De fait, il semble que la meilleure stratégie pour préserver les syndicats d'eau et d'assainissement soit d'encourager la fusion de ces derniers afin que leur taille les mette à l'abri d'une éventuelle absorption.



© DR

HYDROQUEST LA BONNE IDÉE : UNE ARCHITECTURE À AXE VERTICAL

LE 24 SEPTEMBRE 2015, HYDROQUEST ANNONÇAIT OFFICIELLEMENT LE RACCORDEMENT AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL DE SON HYDROLIENNE IMPLANTÉE À ORLÉANS. **ENTRETIEN AVEC JEAN-FRANÇOIS SIMON, PRÉSIDENT D'HYDROQUEST.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

UNE PREMIÈRE DANS L'HEXAGONE POUR UNE HYDROLIENNE FLUVIALE QUI MARQUE LES DÉBUTS PROMETTEURS D'UNE NOUVELLE FILIÈRE INDUSTRIELLE FRANÇAISE ADAPTÉE AUX BESOINS ÉNERGÉTIQUES CROISSANTS DES PAYS INDUSTRIALISÉS COMME DES PAYS ÉMERGENTS. CAR L'HYDROLIEN FLUVIAL CONSTITUE UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE STABLE ET ABONDANTE. CE QUE NOUS EXPLIQUE JEAN-FRANÇOIS SIMON, PRÉSIDENT ET COFONDATEUR D'HYDROQUEST, UNE PME D'UNE DOUZAINÉ DE PERSONNES BASÉE À MEYLAN PRÈS DE GRENOBLE, BERCEAU MONDIAL DE L'HYDRO-ÉLECTRICITÉ.

Quelles sont les origines d'HydroQuest ?

HydroQuest a été créée en juillet 2010 à l'issue d'une dizaine d'années de recherches et développements, y compris de recherches fondamentales, essentiellement à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), mais aussi à l'INSA de Lyon et au CNRS. L'ensemble de ces recherches a abouti à une technologie qui est à la base de ce qu'HydroQuest réalise

aujourd'hui et qui a fait l'objet du dépôt de 9 brevets que nous avons en copropriété avec EDF. Nous avons l'exclusivité de conception, de fabrication et d'exploitation de ces brevets jusqu'à leur échéance. Ces brevets concernent l'ensemble des éléments qui font les « plus » de notre technologie. Entre la phase de conception et celle de réalisation, entre 2010 et 2016, le chemin a connu plusieurs étapes significatives.



© HYDROQUEST

2



© HYDROQUEST

3

Le première fut la réalisation d'une hydrolienne fluviale de 2 m x 2 m, la première de ce type, qui a été installée dans le canal d'amenée de la centrale hydro-électrique de Pont-de-Claix, près de Grenoble.

Cette première machine a permis de valider le concept et de vérifier sa faisabilité. Elle a abouti également à plusieurs modifications permettant d'améliorer ses performances.

Une deuxième hydrolienne fut ensuite testée dans les bassins de la DGA, en Normandie.

La troisième hydrolienne a été vendue à EDF et posée dans une zone amazonienne en Guyane, sur le fleuve Oyapok, dans le village de Camopi, à trois heures de pirogue de tout accès routier, c'est-à-dire dans des conditions extrêmes d'installation et d'exploitation. Cette machine a été installée en 2013 et donne entière satisfaction. Sa mise en œuvre a mis en évidence la résistance de notre machine à l'ensemble des aléas d'un fleuve amazonien.

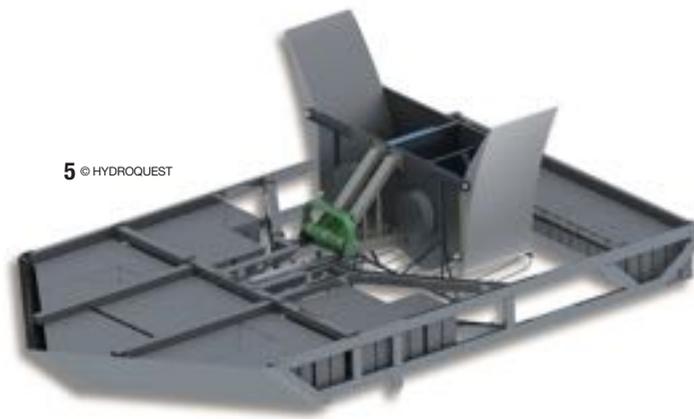
Elle nous a permis de démontrer qu'une hydrolienne fluviale telle que nous l'avons conçue est capable de résister à tout et peut donc être installée facilement et partout dans le monde, quelles que soient les conditions auxquelles elle est confrontée. La quatrième machine produite par HydroQuest, que l'on peut qualifier de définitive, est installée sur la Loire à Orléans, depuis 18 mois, en zone urbaine, dans un site classé « Natura 2000 », c'est-à-dire très contraignant sur le plan environnemental.

Elle a été raccordée au réseau électrique français ERDF en septembre 2015 après 10 mois de fonctionnement en conditions réelles accompagné de mesures de la production électrique permettant de valider la performance de la machine en milieu naturel.

Suite à la réussite de ce projet, HydroQuest a pour objectif d'implan-



4 © HYDROQUEST



5 © HYDROQUEST

1- Jean-François Simon, président et cofondateur d'HydroQuest.

2- La quatrième hydrolienne conçue par HydroQuest, sur la Loire, à Orléans.

3- La machine d'Orléans, ici en position relevée, est montée sur une barge flottante reliée au lit du fleuve.

4 & 5- Schémas de principe de l'hydrolienne River 1.40 au travail et en position relevée de maintenance.

6- La troisième hydrolienne a été vendue à EDF et posée dans une zone amazonienne en Guyane, sur le fleuve Oyapok.

7- Mise à l'eau de l'hydrolienne expérimentale d'EDF dans le fleuve Oyapok.

ter à travers le monde des parcs de plusieurs dizaines de machines permettant d'alimenter en électricité des dizaines de milliers de personnes.

Les hydroliennes HydroQuest sont installées en parcs de plusieurs dizaines de machines afin d'optimiser la production d'un site et les coûts. Chaque site d'hydroliennes peut représenter de quelques centaines de kW à plusieurs MW de puissance. Leur rendement énergétique est en effet très élevé et ces turbines affichent à l'heure actuelle un facteur de charge 3 à 4 fois plus important que celui des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques.

Comment votre produit est-il conçu ?

La technique de base est commune au marin et au fluvial, qu'il s'agisse d'ailleurs d'éolienne ou d'hydrolienne mais notre produit est fondamentalement différent de ce qui existe actuellement.

Il s'agit d'un système à deux colonnes contrarotatives à axe vertical sur lesquelles on empile deux roues, voire trois qui alimentent des génératrices en partie supérieure. L'absence de moyeu central situé dans le flux productif

supprime les turbulences nuisibles à l'efficacité.

Des carénages latéraux hydrodynamiques augmentent la vitesse de l'eau, sachant que, en hydrocinétique, la puissance est fonction du cube de la vitesse.

Ce type de machine ne peut être installé que dans des fleuves dont la vitesse du courant se situe au minimum entre 1,5 et 2 m/s.

Trois types d'installations sont possibles : l'hydrolienne peut être montée sur une barge flottante, ou liée au sol, par exemple, par des pieux, ou encore fixée sur une structure portante appuyée sur les berges.

L'un des atouts de nos machines est leur facilité d'installation et de maintenance. Il suffit de quelques pieux de petites dimensions pour les fixer. Placées sous une barge, elles se remontent aisément. Elles se contentent d'une profondeur de 2 mètres et fournissent une puissance de 40 kW. Dans des conditions idéales, le coût du mégawattheure n'est que de 50 euros, proche de celui du nucléaire.

La machine d'Orléans est montée sur une barge flottante reliée au lit du fleuve par des câbles eux-mêmes fixés à des micropieux : l'avantage d'un tel dispositif est de permettre à la barge de suivre les variations de hauteur de l'eau.

Il s'agit, de plus, d'un système de fixation extrêmement léger et simple à mettre en œuvre par une petite équipe, ce qui est indispensable si l'on veut intervenir au fin fond de l'Afrique ou au cœur de la forêt amazonienne.

Quelles sont les difficultés particulières propres à l'installation d'hydroliennes en site fluvial ?

Il y a deux problèmes critiques qu'il est impératif de résoudre. Le premier est la résistance de la machine aux embâcles, c'est-à-dire à l'ensemble ▷

© HYDROQUEST

6

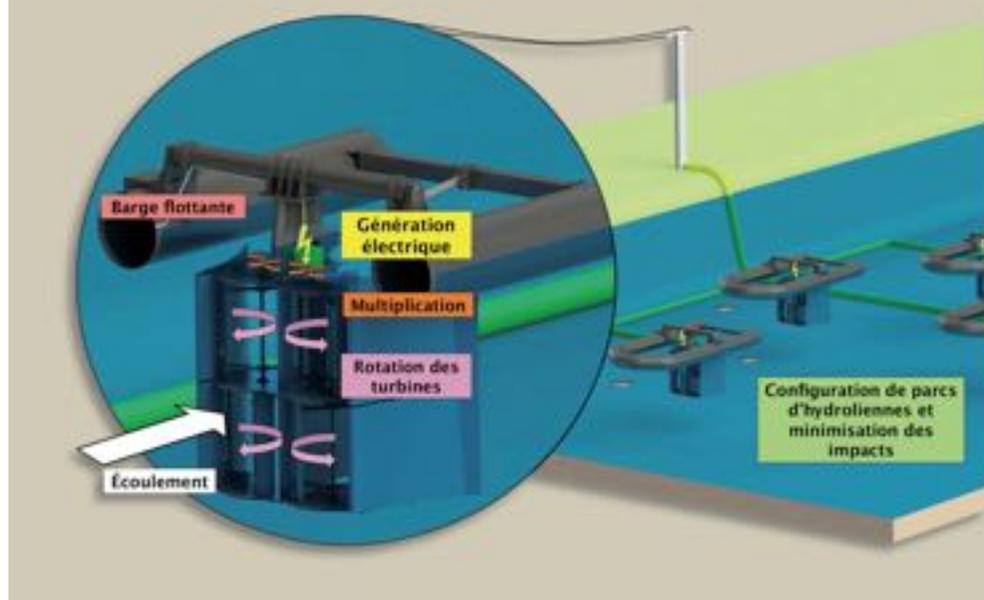


© HYDROQUEST

7



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'HYDROLIENNE D'HYDROQUEST À AXE VERTICAL



des éléments flottants plus ou moins volumineux charriés par le courant. Le second est la maintenance.

Nous avons des solutions particulièrement performantes pour les deux. La forme de la barge flottante assure la déviation latérale de ces embâcles tandis qu'un système de grille relevable retient les éléments qui se présentent devant les colonnes rotatives. Cette grille est elle-même autonettoyante car le relevage de la machine pour la maintenance la met à contre-courant, ce qui assure la chasse automatique des débris accumulés.

La maintenance est facilitée, non seulement par la simplicité de construction de la machine mais aussi par la présence de capteurs et d'une caméra aux endroits critiques permettant de détecter immédiatement les éventuels incidents de fonctionnement.

Autre avantage, la petite taille des dispositifs permet de garantir un impact environnemental minimal. Ils ne gênent pas de retenue d'eau et ne modifient pas le débit de la rivière. Ces hydroliennes n'utilisent pas de produits polluants et n'ont donc pas d'impact sur la faune aquatique grâce également à la faible vitesse de rotation des turbines.

Pour quelles raisons avez-vous choisi la technique de l'axe vertical et quels sont ses avantages ?

Les éoliennes à axe horizontal présentent toutes une zone de perturbation hydrodynamique autour du noyau mais qui représente peu de chose par rapport à la surface balayée et que l'on compense d'ailleurs par la longueur des pales.

En revanche, ce problème reste très difficile à résoudre dans l'eau avec des hydroliennes à axe horizontal, qu'elles soient en site marin ou en site fluvial, car il est impossible de disposer de la même longueur de pales que dans l'air. De plus cette zone de perturbation est amplifiée car l'eau est un milieu

qui est 850 fois plus dense que l'air. De ce fait, le rendement de l'hydrolienne s'en trouve diminué.

Nos concurrents ont partiellement résolu ce problème de deux façons différentes : soit en installant des carénages autour des pales, ce qui permet d'augmenter la vitesse de l'eau et donc le rendement de l'hydrolienne mais entraîne également un surcoût significatif, soit en évitant le rotor, ce qui améliore l'hydrodynamisme du système mais crée une forte contrainte au niveau de sa tenue par l'extérieur et contribue donc également à augmenter le prix de revient de la machine.

Notre approche a été dès le départ complètement différente. Les génératrices sont situées au-dessus des axes rotatifs verticaux de telle sorte que la partie dynamique située à l'intérieur de la structure de l'hydrolienne n'est affectée par aucun élément perturbateur.

Comment l'offre d'HydroQuest est-elle constituée ?

Nous disposons d'une gamme de deux modèles : l'HydroQuest River 1.40 à 2 étages d'une puissance nominale de 40 kW et l'HydroQuest River 2.80, également à 2 étages, d'une puissance nominale de 80 kW.

8- Principe de fonctionnement de l'hydrolienne d'HydroQuest à axe vertical.

9- La forme de la barge flottante assure la déviation latérale des embâcles.

10- La maintenance est facilitée par la simplicité de construction de la machine.

représente environ 10 à 30 milliards d'euros de chiffre d'affaires direct.

La réserve mondiale de gisements hydrauliques est très importante.

Dans les pays émergents, les critères favorables sont multiples : de forts besoins exprimés, des réseaux peu performants, de nombreux gisements hydrauliques non exploités et peu d'énergies à prix compétitif comme le nucléaire.

Quant au marché des énergies des marées océaniques, il représente un potentiel de l'ordre de 60 GW.

Quels sont vos clients et comment procédez-vous avec eux ?

Nos clients sont toujours des énergéticiens, de toutes tailles, publics ou privés dont le métier est de produire et de vendre de l'électricité.

Nous avons la capacité de déterminer pour eux, nous-mêmes ou en collaboration avec des sociétés d'ingénierie spécialisées, les meilleurs sites.

À partir de là, nos clients retiennent un ou plusieurs sites dont ils nous confient l'équipement en « fermes » d'hydroliennes.

L'installation d'une hydrolienne unique n'aurait aucun sens sur le plan économique : il importe de raisonner par

La River 1.40 nécessite une profondeur minimale de 2,20 m, la River 2.80, de 4,20 m.

Le fait d'avoir une modularité, avec un ou deux étages, constitue un atout car il permet d'adapter la machine à la hauteur de l'eau et de pouvoir en tirer le meilleur parti.

Sur le marché de l'énergie, comment se situe le secteur fluvial ?

Les études de marché montrent que les hydroliennes fluviales pourraient apporter une contribution significative : le potentiel mondial de 3 à 10 GW



© HYDROQUEST

9



© HYDROQUEST

10

« fermes », c'est-à-dire par l'installation au minimum d'une dizaine de machines capables de fournir entre 500 kW et 4 à 5 MW par site.

Lorsque le projet est conclu, HydroQuest assure alors la fabrication, le prémontage en France des hydroliennes puis leur démontage, l'expédition par conteneurs, l'acheminement sur site, le montage, la mise en place des structures de fixation et de connexions, la mise en route, la formation des personnels d'exploitation pour l'utilisation et la maintenance.

Quelles sont les forces en présence sur le marché des hydroliennes fluviales ?

Il doit exister actuellement de l'ordre de 60 à 70 constructeurs d'hydroliennes fluviales, dans le monde, toutes des PME ou des TPE, car le marché est extrêmement dispersé sur tous les continents, ce qui n'intéresse pas les groupes.

Il concerne pour une grande part les pays émergents qu'il faut électrifier. Les perspectives de développement sont importantes lorsqu'on constate, par exemple, que seul 7 % du potentiel en énergie hydro-électrique est utilisé en Afrique tandis que ce pourcentage est de 30 % en Amérique du Sud et de 22 % en Asie.

Nous évaluons le marché global de l'hydrolien fluvial à 15 milliards d'euros.

Quels sont les projets que vous avez en cours dans l'immédiat ?

Nous avons actuellement trois projets en France.

Le plus avancé et le plus important est celui conclu récemment, d'une puissance de 2 MW : il concerne l'installation de 39 hydroliennes dans le Rhône, dans le département de l'Ain, en amont de Lyon. Ce projet est soutenu par l'Ademe.

Il sera lancé dans les mois à venir. Les deux autres sont en cours de finalisation.

En plus de ces projets en France, quels sont déjà vos objectifs à l'étranger ?

Nous considérons que l'essentiel du marché est à l'exportation, à 95 %, et nous avons entamé des démarches un peu partout dans le monde dont certaines sont déjà très avancées. En Afrique, notamment, des opérations sont engagées au Cameroun, en Angola, au Congo et à Madagascar. En Amérique du Sud, des contacts sont en cours au Brésil.

HYDROQUEST : LA GAMME FLUVIALE

Baptisée « HydroQuest River », la gamme d'hydroliennes fluviales d'HydroQuest utilise l'énergie cinétique des cours d'eau. Ainsi, la production d'énergie se fait de manière régulière et prédictible. L'hydrolienne est adaptable à tout profil de rivière offrant un minimum de 2 mètres de tirant d'eau.

Fabriquées en France, elles se composent de turbines hydrauliques à axe de rotation vertical et reposent sur une barge flottante amarrée au fond du fleuve, afin de faciliter la maintenance et les contrôles.

L'HydroQuest River 1.40 est une hydrolienne avec un étage de deux roues. Elle est constituée d'une turbine, de génératrices et d'une barge de support. Caractéristiques principales :

- Profondeur minimale du cours d'eau de 2,20 m ;
- Roues de diamètre 1 500 mm et hauteur 1 500 mm ;
- Hauteur totale 1,80 m ;
- Largeur totale 5,90 m ;
- Puissance nominale électrique 40 kW par hydrolienne avec une vitesse d'écoulement de 3,10 m/s.

L'HydroQuest River 2.80 est une hydrolienne avec deux étages de deux roues. Elle est constituée d'une turbine, de génératrices et d'une barge de support. Caractéristiques principales :

- Profondeur minimale du cours d'eau 4,20 m ;
- Roues diamètre 1 500 mm et hauteur 1 500 mm ;
- Hauteur totale 3,60 m ;
- Largeur totale de 5,90 m ;
- Puissance nominale électrique 80 kW par hydrolienne avec une vitesse d'écoulement de 3,10 m/s.

La demande énergétique en constante augmentation et l'urgence des enjeux climatiques imposent désormais le développement d'énergies renouvelables, économiquement viables et à faible impact environnemental, mais également l'approvisionnement des centaines de millions d'habitants encore privés de raccordement aux réseaux électriques nationaux (1,4 milliards d'habitants de la planète ne sont pas connectés au réseau électrique, dont 650 millions en Afrique).

Avez-vous également des ambitions sur le marché de l'hydrolien marin ?

L'approche du marché marin est différente. Il faut savoir que le marché marin est 20 fois plus important que le fluvial mais aussi qu'il est très localisé dans des sites particuliers car il concerne essentiellement des courants de marée et les endroits dans le monde où ces courants sont forts sont relativement peu nombreux.

Ces courants ont pour caractéristiques d'être prévisibles et particulièrement forts : c'est le cas, par exemple du Raz Blanchard, au large de Cherbourg, dont la capacité potentielle en hydrolien marin est équivalente à celle de trois centrales nucléaires.

En Europe, au moins 85 % de ce marché se concentrent entre la France et les Îles Britanniques.

Des sites ont également été mis en évidence dans la Baie de Fundy, au Canada, au large de la Corée du Sud et au Chili ainsi qu'en Australie.

Compte tenu de ses caractéristiques, ce marché intéresse les grands groupes et il nous fallait donc, pour y accéder, disposer d'une dimension internationale. C'est ce que nous avons réalisé en faisant une alliance stratégique avec les Constructions Mécaniques de Normandie (CMN) qui sont, en fait, les chantiers navals de Cherbourg et qui sont entrés à hauteur de 14 % dans notre capital. Pour entrer dans le marché marin, il nous fallait des capitaux car on change d'échelle : alors que les hydroliennes fluviales ont un poids de l'ordre de 15 tonnes pour une production nominale de 40 à 80 kW, les machines marines se situent à plusieurs centaines de tonnes pour une production nominale de 2 MW.

CMN nous apporte les capitaux et le savoir-faire marin, HydroQuest contribue à « lisser » leur production industrielle.

La première étape de notre collaboration avec CMN, avec lesquelles nous sommes encore en phase de recherche

et développement, sera de mettre à l'eau en mer une machine de 1 MW, sur la plateforme d'essais d'EDF au large de l'île de Bréhat, au cours du premier semestre 2017, projet qui est également soutenu par l'Ademe. Cette machine sera posée sur les fonds marins. L'un de ses atouts est qu'elle tire parti des courants marins quelle que soit leur direction, c'est-à-dire aussi bien à marée montante qu'à marée descendante, sans qu'il soit nécessaire de changer la machine de sens toutes les 6 heures.

Par ailleurs, sa conception à axe vertical la rend peu sensible à l'angle d'orientation du courant, ce qui n'est pas le cas des hydroliennes à axe horizontal. La possibilité de disposer d'un ou deux étages, d'une dizaine de mètres chacun, lui permet également de s'adapter facilement à la profondeur du site.

La feuille de route consiste à réaliser, un an plus tard, une ferme-pilote marine de plusieurs machines et la commercialisation de nos hydroliennes marines pourrait intervenir dès 2019.

L'avenir semble donc prometteur pour HydroQuest, en dépit d'une concurrence qui est également très présente sur ce marché.

Nous sommes fiers d'être les premiers à avoir raccordé une hydrolienne au réseau électrique français. Forts des succès rencontrés avec nos hydroliennes fluviales testées en conditions réelles, nous avons lancé il y a quelques semaines la commercialisation de notre gamme afin de contribuer à la dynamisation de la filière industrielle française et de répondre aux besoins énergétiques croissants des pays industrialisés et des pays émergents.

C'est dans cet objectif que j'ai accompagné en juillet dernier le chef de l'État François Hollande dans ses voyages d'État au Bénin, au Cameroun et en Angola. La France doit se positionner aujourd'hui comme un modèle international dans le secteur des énergies marines et fluviales, notamment à travers la mise en place d'une ferme pilote significative qui permettra de démontrer à des clients du monde entier les capacités de l'hydrolien.

Nous considérons que nous pourrions produire entre 300 et 500 machines par an, d'ici à 2020, tout en procédant à la création d'une certaine d'emplois. Dans le domaine des hydroliennes fluviales, nous sommes les plus avancés au monde. La fiabilité de notre concept, protégé par neuf brevets, est prouvée. Son efficacité également. □



CNR

DE L'EAU DU RHÔNE AU SOLEIL ET AU VENT

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

PARTICIPANT ACTIVEMENT À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, LA COMPAGNIE NATIONALE DU RHÔNE - CNR - PRÉVOIT DE TRIPLER, D'ICI 2020, SA PUISSANCE INSTALLÉE EN ÉOLIEN ET PHOTOVOLTAÏQUE (600 MW SUPPLÉMENTAIRES EN FRANCE ET 300 MW EN EUROPE). POUR CONFORTER SA POSITION DE PREMIER PRODUCTEUR FRANÇAIS D'ÉNERGIE 100% RENOUVELABLE, CNR MISE SUR L'INNOVATION, NOTAMMENT DANS LES DOMAINES DE L'ÉOLIEN ET DU PHOTOVOLTAÏQUE QUI S'AJOUTENT À SA MISSION HISTORIQUE DE PRODUCTEUR D'ÉNERGIE D'ORIGINE HYDRAULIQUE ET DE PROMOTEUR DE LA NAVIGATION FLUVIALE. UNE INNOVATION MISE AU SERVICE D'UN DÉVELOPPEMENT DURABLE DES TERRITOIRES DANS LESQUELS ELLE EXERCE SES ACTIVITÉS. JULIEN CHAUMONT, RESPONSABLE DÉVELOPPEMENT ÉOLIEN ET PHOTOVOLTAÏQUE À LA DIRECTION DU DÉVELOPPEMENT DE CNR FAIT LE POINT SUR LES RÉALISATIONS ET LES PROJETS DE L'ENTREPRISE DANS CE DOMAINE.

CNR dispose à ce jour d'une capacité de production installée de plus de 3 500 MW en hydraulique, éolien et solaire, ce qui fait d'elle le premier producteur d'énergie 100% renouvelable en France.

La puissance installée se répartit comme suit, à fin juin 2016 :

- **Hydraulique** : 3 035 MW,
- **Éolien** : 424 MW,
- **Photovoltaïque** : 51 MW.

Pour une production d'électricité se situant, en moyenne annuelle, autour de 15 TWh. CNR fournit notamment le quart de l'hydroélectricité nationale.

TROIS MISSIONS POUR UN MODÈLE INDUSTRIEL D'INTÉRÊT GÉNÉRAL

CNR se distingue par sa vocation d'aménageur de territoires. Elle a conçu autour de la concession du fleuve Rhône un modèle redistributif

dans lequel la production d'électricité verte se conjugue avec l'aménagement des territoires.

Selon une logique voulue à la création de la Compagnie Nationale du Rhône, en 1933, les revenus tirés de l'exploitation du fleuve, bien commun, doivent bénéficier au territoire. « *Lorsque l'État a créé la concession du Rhône, indique Julien Chaumont, il a couplé à la source de revenus qu'est la production d'électricité deux missions dites d'in-*

térêt général que sont la navigation et l'irrigation ». CNR a ainsi créé une voie navigable à grand gabarit de Lyon à la Méditerranée et gère un réseau de 18 plateformes industrielles et portuaires. Cette logique d'intérêt général a été réaffirmée par CNR en 2004 avec le lancement d'une démarche volontariste de missions d'intérêt général. Plus de 500 projets ont déjà été menés pour les énergies renouvelables, le transport fluvial, le développement touristique

1- Le parc photovoltaïque et éolien de Bollène dans le Vaucluse.

2- Julien Chaumont, responsable Développement Éolien et Photovoltaïque à CNR.

3- Les installations de CNR à Bourg-lès-Valence.

ou encore l'agriculture durable. « *Cela conforte, au-delà de nos missions historiques, notre rôle d'aménageur des territoires traversés par le fleuve et notre ambition de concilier les nombreux usages de l'eau* ».

CNR est en cela un modèle d'équilibre unique en France, qui relie l'énergie et les territoires, l'industrie et l'environnement, la performance économique et l'intérêt général, le développement et le durable dans une vision d'aménagement à long-terme. Son capital, majoritairement public (Caisse des Dépôts et collectivités territoriales) avec un actionnaire de référence, le Groupe Engie, en témoigne également.

CNR s'appuie, depuis 2003, sur un équilibre de son actionariat public-privé :

- **Le Groupe Engie** : 49,97 %,
- **La Caisse des dépôts** : 33,20 %,
- **Des Collectivités territoriales** : 16,83 % (dont 5,38 % détenus par le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône).

LES NOUVELLES ÉNERGIES RENEUVELABLES DEPUIS 10 ANS

« *La seule concession du Rhône représente 3000 MW, poursuit notre interlocuteur. L'essentiel du programme d'aménagement du Rhône est achevé. Il est complété ponctuellement par la création de petites centrales hydro-électriques qui valorisent le débit réservé au Vieux-Rhône - bras naturels du fleuve. Depuis 10 ans, nous avons diversifié notre mix énergétique à l'éolien et au photovoltaïque qui représentent d'ores et déjà 12% de notre production ! Pour atteindre notre objectif de 4000 MW de puissance installée à l'horizon 2020, nous avons donc un important programme d'investissements dans ces deux nouvelles énergies.* »

La présence de CNR dans l'activité éolienne se situe majoritairement dans le très grand quart Sud-Est de

© CNR - CAMILLE MOIRENC - JUAN ROBERT



2

CNR : LE PATRIMOINE

19 barrages (Génissiat, Seyssel, Motz, Lavours, Champagnoux, Sault-Brénaz, Pierre-Bénite, Reventin-Vaugris, Saint-Pierre-de-Bœuf, Arras-sur-Rhône, Bourg-lès-Valence, Charmes-sur-Rhône, Le Pouzin, Château-neuf-du-Rhône, Bollène, Caderousse, Avignon, Sauveterre, Beaucaire) ;

19 centrales hydroélectriques (Génissiat, Seyssel, Angletfort, Brens-Virignin, Brégnier-Cordon, Sault-Brénaz, Pierre-Bénite, Reventin-Vaugris, Sablons, Gervans, Bourg-lès-Valence, Beauchastel, Le Logis Neuf, Château-neuf-du-Rhône, Bollène, Caderousse, Avignon, Sauveterre, Beaucaire) ;

1 centrale en coexploitation : Chancy-Pougny ;

9 petites centrales hydroélectriques ;

8 mini-centrales hydroélectriques ;

19 écluses dont 14 à grand gabarit et 5 de plaisance ;

33 parcs éoliens ;

14 centrales photovoltaïques ;

400 km de digues ;

32 stations de pompage ;

330 km de voies navigables à grand gabarit ;

27 000 hectares de domaine concédé : 14 000 hectares de fleuve et 13 000 hectares terrestres dont 836 amodiés ;

27 sites industriels et portuaires parmi lesquels le Port Édouard-Herriot de Lyon.



3

© CNR - CAMILLE MOIRENC - JUAN ROBERT

la France (Auvergne-Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Occitanie, sud Bourgogne-Franche-Comté).

L'entreprise s'appuie sur des partenaires pour se développer également dans le Nord et l'Ouest de la France (Hauts de France, Normandie, Bretagne, Pays-de-la-Loire).

UN ACTEUR INTÉGRÉ

Un bref retour en arrière permet de comprendre l'évolution de l'activité. Avant 2000, lorsque EDF avait le monopole de la production d'électricité, CNR était essentiellement en charge du génie civil et de la maintenance de ses installations tandis que la production proprement dite d'électricité était confiée à des agents EDF missionnés, présents physiquement dans les installations hydroélectriques.

Lors de l'ouverture du marché de l'électricité décidée par la Commission Européenne au début des années 2000, CNR redevient producteur indépendant de plein exercice. Elle se trouve dans l'obligation de déclarer au quotidien la production du lendemain et de s'y tenir, sous risque d'encourir des pénalités, ce qui n'est pas sans poser des problèmes lorsque la source de production est unique.

« *Elle met alors en place un outil et un système de gestion des énergies renouvelables, précise Julien Chaumont, afin d'affiner les prévisions et le programme de production, avec trois équipes spécifiques :*

→ *Une équipe de prévisionnistes météo chargés de quantifier la pluie, la fonte des neiges sur les bassins versants, l'arrivée d'eau dans les affluents du Rhône (Isère, Ardèche...),*

→ *Une équipe de pilotage centralisé des 19 ouvrages hydroélectriques du Rhône, qui réalise le programme établi de productions,*

→ *Une équipe qui vend l'énergie produite sur les bourses européennes.* »

Cette organisation (COCPIT), unique en France, permet d'adapter l'optimisation de la gestion du Rhône en fonction du contexte (conditions climatiques, travaux de maintenance...).

Le cas de l'éolien et du photovoltaïque est un peu différent puisque, jusqu'à aujourd'hui, l'énergie est vendue à l'obligation d'achat, c'est-à-dire à un prix fixé à l'avance, via l'intermédiaire de l'opérateur historique qu'est EDF. Cela va changer : il va falloir mettre en vente ces deux types d'énergie sur le marché.



4

© CNR - CAMILLE MOIRENC - JUAN ROBERT

Tous les parcs vont devoir basculer progressivement à partir de 2018 dans le nouveau mécanisme.

« CNR est prête à le faire pour ses installations car nous maîtrisons toute la chaîne de création de valeur. Nous le faisons aussi depuis plus de 5 ans pour des petits producteurs d'hydroélectricité, qui n'ont pas accès au marché. Demain, nous comptons être un acteur de référence du marché français de l'agrégation. »

Ce changement, CNR l'avait déjà anticipé, le corollaire étant qu'il ne lui suffisait plus de disposer d'un parc installé exclusivement dans le quart Sud-Est. Il lui était apparu qu'il était plus rationnel de bien foisonner son parc en profitant des trois régimes de vent répertoriés en France : le Mistral et la Tramontane dans le Sud-Est, le vent du Nord et le vent d'Ouest, dans la moitié Nord et Ouest du pays.

Ainsi, CNR gèrera mieux l'intermittence due aux aléas météorologiques. La flexibilité de la production sur le Rhône pourra participer à la compensation des variations de production de l'éolien. « Notre atout, c'est le Rhône. Aujourd'hui sur le fleuve, nous réduisons les écarts grâce à la Téléconduite et au Front Office. Demain, avec le Rhône, le photovoltaïque et l'éolien nous pourrions utiliser sa flexibilité, arbitrée par le marché, pour équilibrer l'ensemble du mix énergétique. Nous pourrions ainsi proposer aux propriétaires de parcs ayant besoin de commercialiser leur production sur le marché une valorisation supérieure de leur énergie et donc des prix plus attractifs que nos concurrents ».

Actuellement, CNR dispose d'un parc éolien d'une capacité de 400 MW (200 machines) et d'un parc photovoltaïque de 50 MW (200 000 panneaux).

4- Le parc éolien de Beaucaire, dans le Gard.

5- Les panneaux photovoltaïques du parc du Comte, près de Beaucaire, dans le Gard.

6- Trait d'union entre les Alpes suisses et la mer Méditerranée, ViaRhôna permet la découverte à vélo de la vallée du Rhône, ses espaces naturels, son patrimoine unique, ses sites remarquables et sa gastronomie. Ici, à hauteur de la centrale-écluse de Bourg-lès-Valence.

UN DÉVELOPPEMENT EN CONCERTATION AVEC LES TERRITOIRES

CNR envisage ses développements selon une philosophie de concertation et de co-construction avec les territoires.

« Lorsque nous développons des projets éoliens ou photovoltaïques, poursuit Julien Chaumont, l'environnement est une priorité. Nous choisissons donc des sites sans enjeu important avec la faune, la flore, le patrimoine et l'habitat.

Par exemple, nous optons pour des terrains déjà marqués par l'activité humaine sans conflit d'usage avec l'agriculture pour le photovoltaïque : anciennes carrières, mines désaffectées, friches industrielles...

En Ardèche, au sud d'Aubenas, notre site de 24 hectares de Largentière - 42 000 panneaux solaires, d'une capa-



5



6

© CNR - CAMILLE MOIRENC - JUAN ROBERT



citée de production de 12 MW - est une ancienne mine d'argent. Il est dimensionné pour couvrir en électricité les besoins annuels d'une population de 5000 habitants.

Dans les Hautes-Alpes, à Vitrolles, il s'agit d'un délaissé autoroutier d'Escota issu de la construction de l'A51 que nous avons réhabilité et revalorisé avec l'installation d'un parc photovoltaïque d'une puissance de 2,9 MW composé de 10 700 panneaux solaires, ce qui correspond à la consommation électrique moyenne, hors chauffage, de 1 760 foyers ».

7- Le parc photovoltaïque expérimental du Coquillon à Vallabrègues dans le Gard.

8- Détail des panneaux photovoltaïques à concentration du parc du Coquillon.

9- Remotorisation-repowering du parc de Rochefort-en-Valdaine, dans la Drôme.

DEUX TECHNOLOGIES

Pour le photovoltaïque, CNR met en œuvre deux types de technologies : les panneaux sont installés soit sur des châssis fixes, soit sur des « trackers » ou suiveurs solaires.

Les deux technologies font appel à des panneaux au silicium cristallin, matériau semi-conducteur dopé au bore et au phosphore pour capter les photons et convertir cette énergie en électricité. « Schématiquement, les châssis fixes sont intéressants pour des zones à ensoleillement direct modéré, au nord de Valence. Le tracker est mieux adapté

aux zones à ensoleillement direct dès qu'il est possible de suivre le soleil pendant sa course. Lorsque l'ensoleillement direct est modéré, le coût engendré pour la mise en place d'un tracker ne serait pas compensé par le gain de production.

Les châssis fixes sont inclinés plein sud, les trackers sont installés sur des lignes nord-sud, ce qui permet aux panneaux de suivre le soleil d'est en ouest ».

Le système vise à orienter en temps réel les capteurs vers le soleil, pour placer le panneau dans une position ▷





optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au rayonnement si possible), car tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons) la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon la latitude. Cette adaptation en temps réel a pour effet de substantiellement augmenter la captation et production d'énergie.

À noter qu'il existe également des trackers deux axes, qui suivent la course du soleil sous des angles multiples à la manière des tournesols mais nécessitent des superficies plus importantes afin qu'ils ne se fassent pas d'ombre les uns sur les autres. La technologie la plus souvent retenue est donc celle du tracker à un axe.

En ce qui concerne l'avenir du photovoltaïque, Julien Chaumont considère qu'il réside essentiellement dans l'évolution des panneaux : « Dans sa conception, la technologie est simple. Les vrais progrès résideront dans l'amélioration du rendement des panneaux, éventuellement dans l'émergence de nouvelles technologies. Plusieurs d'entre elles ont émergé depuis déjà quelques temps mais n'ont pas encore réussi à se faire une place. Le silicium pourrait être remplacé par d'autres matériaux dits à couche mince ».

La technologie qui semble sur le point d'émerger est celle du photovoltaïque à concentration. Son principe consiste à positionner une cellule de 1 cm² à très haut rendement derrière une lentille de Fresnel qui concentre les rayons du soleil. « Cela implique que le panneau soit systématiquement installé sur un

suiveur deux axes de façon à être en permanence face au soleil, faute de quoi, un décalage de 1° conduirait à une perte immédiate de la production. Il faut par ailleurs qu'il y ait de l'ensoleillement direct. Il s'agit donc d'une technologie qui a plutôt vocation à être installée dans des zones à ensoleillement direct très fort tels que les déserts. C'est une technologie émergente qui est encore en cours de développement car elle est coûteuse tant en ce qui concerne la cellule que la lentille et qui réclame une mécanique de précision ». À titre expérimental, CNR

10- CNR exploite sur le Rhône 19 barrages et centrales-écluses.

11- L'écluse de Belley, dans l'Ain, a fait l'objet d'un très bel aménagement paysagé assurant sa parfaite intégration dans le site.

a déjà installé un parc, de 1,2 MW, dont 0,4 MW avec cette technologie innovante fournis par 1 000 panneaux à Vallabrègues, dans le Gard.

ÉOLIEN : 200 MACHINES

Pour l'éolien, le respect de la biodiversité, de l'habitat et des paysages constitue des points d'attention majeurs. Les implantations répondent à des exigences plus complexes directement liées au contexte local.

Elles sont réalisées à l'issue d'une étude d'impact d'un an prenant en compte plusieurs critères, à commen-



12- La salle des machines de la centrale de Bollène est un témoignage de l'histoire technique et architecturale de l'immédiat après-guerre : elle est l'œuvre de Théodore Sarnal, un élève des frères Perret.

13- L'élévation ordonnancée en béton armé, rythmée par des piliers et des claustras vitrées de la centrale de Bollène est un haut-lieu du tourisme fluvial dans le Vaucluse.

CNR EN CHIFFRES (à fin 2015)

- 25% de l'hydroélectricité française ;
- Plus de 15 TWh de production d'électricité en moyenne annuelle ;
- 3453 MW de puissance totale installée ;
- 3035 MW en hydraulique (19 centrales hydroélectriques et 21 petites centrales hydroélectriques et mini-centrales hydroélectriques) ;
- 371 MW en éolien (32 parcs) ;
- 47 MW en photovoltaïque (14 centrales) ;
- 19 barrages ;
- 18 sites industriels et portuaires ;
- 32 stations de pompage pour l'irrigation ;
- Chiffre d'affaires brut 2015 : 1 097 M€ ;
- Redevance hydraulique versée à l'État : 132 M€ ;
- Effectifs : 1 372 collaborateurs.

cer par l'altitude réglementaire maximale tolérée par la DGAC et l'armée, des enjeux paysagers, la réglementation acoustique.

À ceci s'ajoutent la hauteur de mât et le diamètre du rotor. Une zone boisée et des éléments au sol nécessitent un mât dont la hauteur permette de s'affranchir des turbulences : elle peut atteindre jusqu'à 130 m pour un projet en forêt alors qu'un mât de 80 m sera suffisant sur une plaine bien dégagée. Le diamètre du rotor dépasse désormais 120 m.

Il faut enfin choisir la machine la mieux adaptée au régime de vent. Actuellement, CNR travaille avec quatre constructeurs : Enercon, Festas, Nordex et Senvion.

« REPOWERING » ET « RETROFIT »

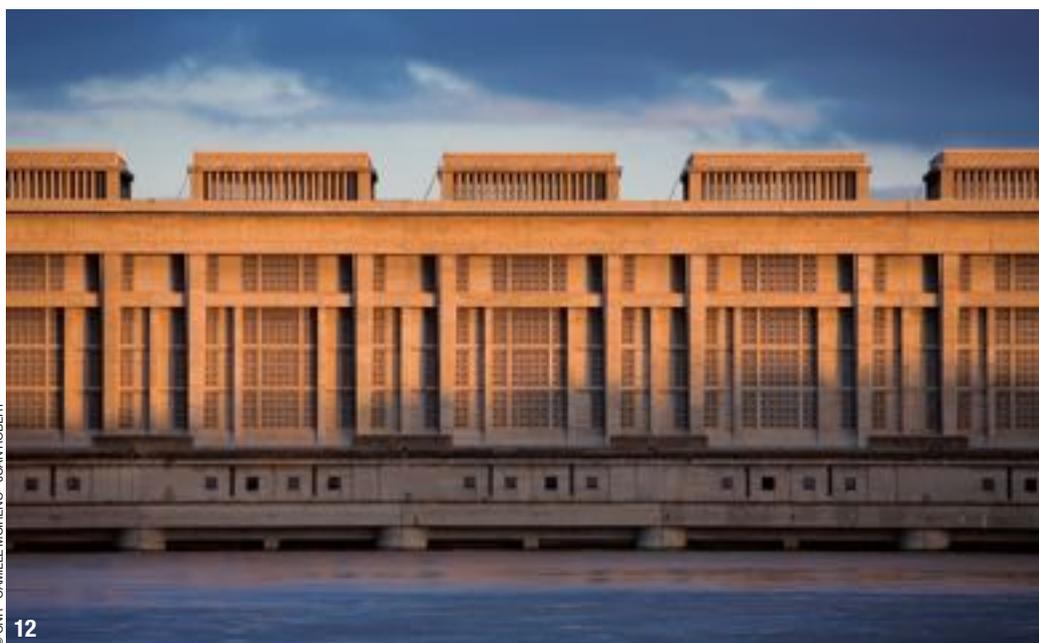
« La tendance est à l'augmentation du gabarit des machines, indique Julien Chaumont : là où, au départ, entre 2000 et 2005, on installait des machines de 100 m de bout de pale, on est passé à des éoliennes qui ont des mâts et des rotors de plus de 100 m c'est-à-dire qui culminent entre 150 m et 200 m d'altitude, pour capter les gisements les plus forts ».

Ce que l'on voit apparaître déjà en Allemagne et qui devrait bientôt arriver en France sont les travaux de « repowering » et de « retrofit » pour remettre à niveau techniquement des parcs vieillissants :

→ Soit supprimer, par exemple, une dizaine de « petites » machines de 80 m de hauteur et les remplacer par six machines nettement plus grosses, nettement plus voilées, nettement plus puissantes, nettement plus productrices d'électricité : c'est le « repowering » ou rééquipement.

→ Soit réaliser de la maintenance lourde sur machines avec un investissement les remettant au goût du jour : c'est le « retrofit » ou rénovation.

« C'est le travail que nous venons d'entreprendre sur l'un de nos parcs à Rochefort-en-Valdaine, dans la Drôme. Il s'agissait de machines qui n'étaient pas bien adaptées au vent régnant dans cette région et qui avaient subi à plusieurs reprises des sinistres ayant nécessité de les brider. Nous avons racheté ce parc de 10 machines de 750 MW, déposé les nacelles et les pales et installé sur les mâts existant de nouvelles nacelles et de nouvelles pales, adaptées au régime de vents ». ▷





14

© CNR - CAMILLE MOIRENC - JUAN ROBERT

CRÉATION DE VALEUR À TOUS LES NIVEAUX

Avec 80 ans d'expérience sur le Rhône, CNR est une entreprise experte qui propose ses services en gestion et commercialisation des énergies intermittentes à d'autres producteurs et exporte son expertise en ingénierie hydroélectrique, fluviale et environnementale dans le monde entier.

Son expertise lui permet aussi d'explorer le potentiel d'autres énergies renouvelables comme l'hydrolien. CNR est impliquée dans le projet de parc pilote développé par le Groupe Engie au Raz Blanchard, dans la Manche. Elle a déposé un dossier suite à l'appel à projets de l'État relatif aux fermes pilotes d'hydroliennes fluviales sur le territoire national. Le projet comprend l'installation d'une ferme de 39 hydroliennes d'une puissance installée de 2 MW sur

CNR : DATES-CLÉS

- 1933** : création de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ;
- 1935 à 1986** : aménagement du Rhône ;
- 2000 à 2004** : CNR retrouve la propriété de ses aménagements et de sa production ;
- 2006** : premier parc éolien ;
- 2008** : première centrale photovoltaïque ;
- 2014-2018** : 3^e plan de missions d'intérêt général de 160 M€.

le Haut-Rhône. Cette première mondiale servira de vitrine internationale à l'export. Positionnée en entreprise-laboratoire des énergies du futur, CNR est active en recherche et innovation pour développer de nouvelles énergies vertes mais aussi rendre les énergies renouvelables

efficaces dans une vision à long terme. Elle travaille sur le stockage des énergies intermittentes, les réseaux intelligents et de nouveaux usages comme la mobilité électrique. Tout cela pour relever le défi de la transition énergétique au service des territoires. □

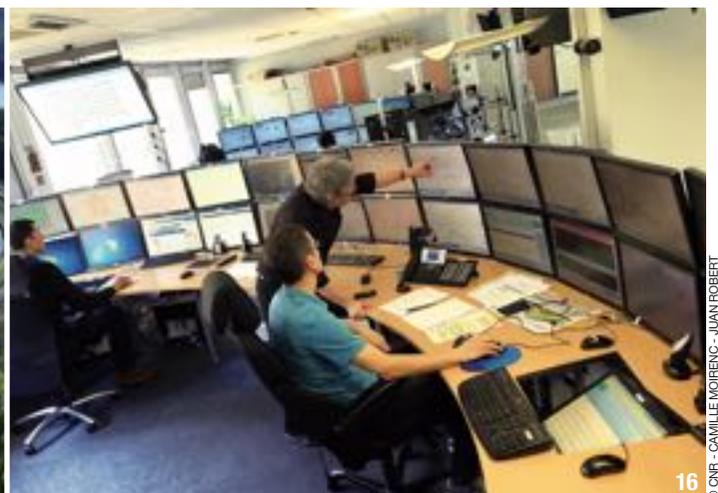
14- Le barrage de Villeneuve-lès-Avignon au lieu-dit l'île de la Barthelasse-île des Papes.

15- Navigation sur le Rhône et le Vieux-Rhône en amont de la centrale-écluse de Gervans, près de Saint-Vallier, dans la Drôme.

16- Le Centre d'Optimisation et de Conduite de la Production InIntermittente (COPTIT).



15



16

© CNR - CAMILLE MOIRENC - JUAN ROBERT

Qui a naturellement 100% d'énergie à revendre ?

CNR, le 1^{er} producteur
français d'électricité
100 % renouvelable

Depuis 80 ans, nous produisons de l'énergie renouvelable issue de l'eau, du vent et du soleil. Nous sommes naturellement engagés dans la transition énergétique et la croissance verte. Nous fournissons déjà le quart de l'hydroélectricité française et œuvrons à l'émergence des énergies de demain.

Découvrez nos 9 engagements en faveur de la transition énergétique et du climat
sur cnr.tm.fr

The logo for CNR (Compagnie Nationale du Rhône) consists of the letters 'CNR' in a bold, red, stylized font.

L'énergie au cœur des territoires



1

© PHOTOTHÈQUE SYSTRA

RECOMMANDATIONS FRANÇAISES POUR LA CONCEPTION GÉOTECHNIQUE ET LA RÉALISATION DES GÉOSTRUCTURES THERMIQUES

AUTEURS : YVON DELERABLÉE, INGÉNIEUR DE RECHERCHE, ANTEA GROUP - ÉRIC ANTOINET, DIRECTEUR TECHNIQUE INFRASTRUCTURES, ANTEA GROUP - JULIEN HABERT, RESPONSABLE DE L'UNITÉ OUVRAGES GÉOTECHNIQUES, CEREMA NORD-PICARDIE - NATHALIE POZZI, RESPONSABLE MÉTHODE, SYSTRA - LIONEL DEMONGODIN, RESPONSABLE ACTIVITÉ EAU SOUTERRAINE ET GÉOTHERMIE, EGIS

EN DÉVELOPPEMENT EN FRANCE DEPUIS QUELQUES ANNÉES, LES GÉOSTRUCTURES THERMIQUES PÂTISSENT D'UN MANQUE DE CADRE TECHNIQUE EN PARTICULIER VIS-À-VIS DES ASPECTS GÉOTECHNIQUES. UN GROUPE DE TRAVAIL COMPOSÉ DE MEMBRES DU COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS (CFMS) ET DU BUREAU GÉOTECHNIQUE DE SYNTEC INGÉNIERIE A ÉTÉ MANDATÉ AFIN DE PRODUIRE DES RECOMMANDATIONS TECHNIQUES PORTANT SUR LA CONCEPTION THERMIQUE ET MÉCANIQUE, SUR LES PROBLÉMATIQUES DE MISE EN ŒUVRE ET SUR LES ASPECTS ASSURANTIELS DE CE NOUVEAU MODE DE VALORISATION DES FONDATIONS.

INTRODUCTION

Les géostructures thermiques ont fait l'objet d'une définition dans le décret 2015-15 du 8 Janvier 2015 : « *Les géostructures thermiques sont des éléments de structure enterrés d'un bâtiment, d'un ouvrage ou d'un équipement, équipés de tubes échangeurs de chaleur dès leur construction. La circulation d'un fluide caloporteur dans les tubes permet l'échange de l'énergie thermique avec le terrain, dans le but de chauffer ou de rafraîchir un bâti-*

ment, un ouvrage ou un équipement ou d'y produire l'eau chaude sanitaire ». Ces ouvrages géotechniques spécifiques, également appelées géostructures énergétiques, fondations thermoactives ou fondations géothermiques, regroupent principalement les pieux, les barrettes, les écrans de soutènement (figure 1) et les radiers. Le fluide caloporteur (de l'eau ou de l'eau glycolée) qui circule dans ce réseau fermé est en relation avec une Pompe à Chaleur géothermique (PACg)

1- Cage d'armatures de paroi moulée énergétique équipée de tubes géothermiques.

1- Concrete reinforcing cage of energy diaphragm wall fitted with geothermal tubes.

qui permet de faire le lien avec le système de chauffage/refroidissement du bâtiment équipé : chauffage en hiver en extrayant des calories du terrain (figure 2) et refroidissement en été en injectant des calories dans le sol. Ces fondations thermoactives sont des dispositifs de géothermie de très basse température : le terrain encaissant est sollicité dans une gamme de température normalement comprise entre +1°C et +35°C. Certains pays possèdent déjà des guides généraux concernant les

2- Schéma de fonctionnement énergétique d'une géostructure thermique.

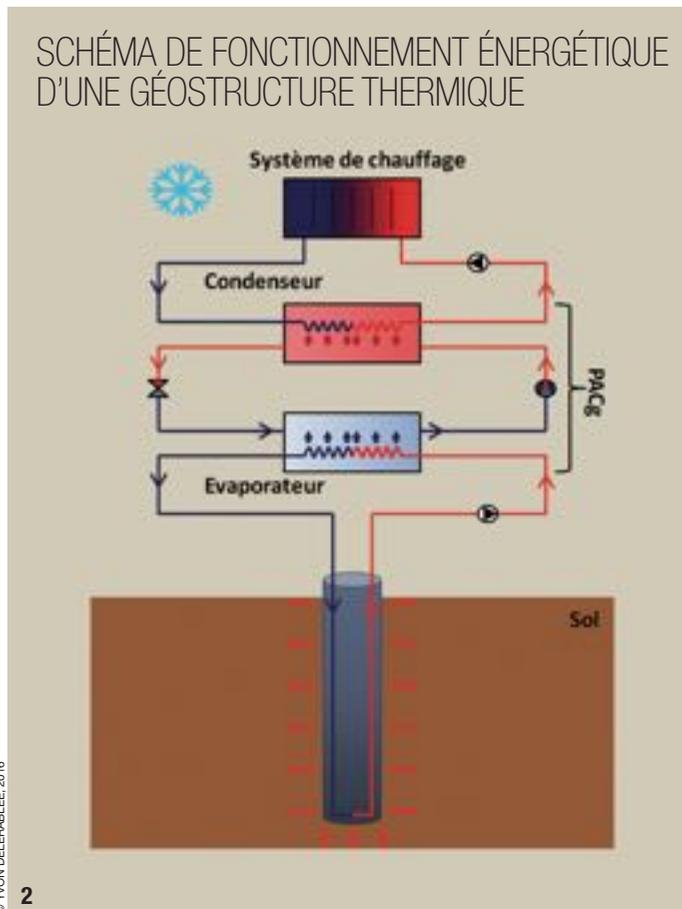
3- Influence du type de géostructure et de son orientation sur l'effet barrage.

4- Impact de l'effet barrage sur la vitesse d'écoulement d'une nappe autour d'une enceinte en paroi moulée.

2- Energy operating diagram of an energy geos-structure.

3- Influence of the geos-structure type and positioning on barrier effect.

4- Impact of barrier effect on the flow velocity of an aquifer around a diaphragm wall enclosure.



géostructures thermiques. On peut citer celui de la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA) pour la Suisse et de la Ground Source Heat Pump Association (GSHPA) en Grande-Bretagne. Ces documents servent actuellement de référence au niveau européen mais ne sont pas toujours adaptés aux méthodes de dimensionnement et de justification françaises. C'est de ce constat qu'est apparu le besoin d'écrire des recommandations en France. L'objectif de ces dernières est d'ap-

porter des éléments techniques théoriques mais surtout pratiques pour la conception et la réalisation de ces géostructures thermiques. Le principe est de se rapprocher des méthodes de calculs développées dans les normes en vigueur et, en particulier, l'Eurocode 7 et ses documents d'application nationale.

DÉMARCHE GÉNÉRALE DE CONCEPTION ÉNERGÉTIQUE

Pour des raisons économiques, les géostructures thermiques ne doivent

impacter, orienter ou contraindre le dimensionnement de l'ouvrage que de façon marginale.

Une opération de géostructure thermique doit être envisagée le plus en amont possible du projet et suivre le déroulement logique de la vie du projet, en s'intégrant aux phases de conception et d'exécution. Elle s'inscrit typiquement dans le cadre d'une démarche à la fois économique et d'écoconception par l'exploitation d'une source d'énergie renouvelable.

La recherche d'un équilibre entre la production de chaud et de froid sur un cycle annuel permet d'éviter une dérive thermique du terrain encaissant, qui altérerait le rendement du système à plus ou moins longue échéance.

NOTION DE POTENTIEL GÉOTHERMIQUE

En effet, dans le cadre des géostructures thermiques, le terrain peut être considéré comme un réservoir d'énergie thermique fini mais qui peut se recharger.

Ainsi, la quantité d'énergie que l'on va pouvoir mobiliser dépend de la capacité thermique volumique du terrain et de la recharge thermique qu'il subit par l'intermédiaire d'un écoulement souterrain ou par l'équilibre entre la production de chaud et de froid. Cette quantité d'énergie correspond au potentiel géothermique.

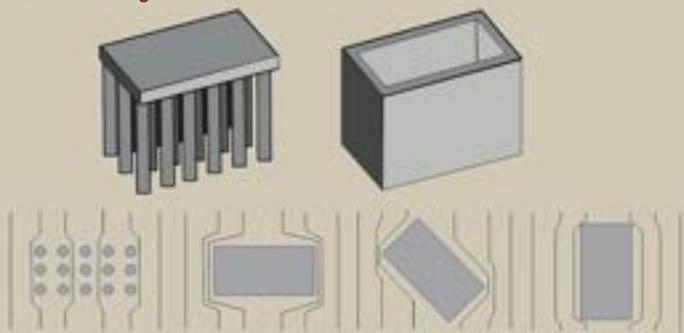
Cette notion est à mettre en relation avec la puissance avec laquelle cette énergie va être transférée. Par exemple, un réservoir qui se recharge lentement doit être exploité avec une puissance faible pour ne pas modifier sa température durablement.

Les deux principaux éléments qui conditionnent la puissance énergétique exploitable sont la conductivité thermique des terrains et la présence d'un écoulement souterrain. Ces deux grandeurs renvoient aux deux mécanismes qui gouvernent les transferts de chaleur en milieux poreux :

- La conduction, liée à l'existence d'un gradient de température ;
- L'advection (ou convection), liée à la présence d'un écoulement souterrain, autrement dit d'une nappe.

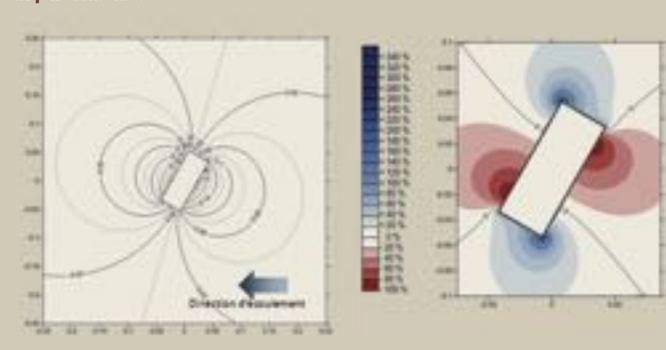
L'état thermique initial du milieu est aussi un paramètre à prendre en compte. ▶

INFLUENCE DU TYPE DE GÉOSTRUCTURE ET DE SON ORIENTATION sur l'effet barrage



3
© PHILIPPE REIFFSTECK

IMPACT DE L'EFFET BARRAGE sur la vitesse d'écoulement d'une nappe autour d'une enceinte en paroi moulée



4
© LIONEL DEMONGODIN, 2015

En condition naturelle et jusqu'à une profondeur de l'ordre de 100 m, la température du sol correspond approximativement à la moyenne annuelle des températures de l'air, soit 14°C en France. En milieu urbain, l'état thermique naturel peut être localement perturbé par la présence de réseaux thermiquement actifs (réseaux d'eaux usées, de chaleur, etc.) ou par une installation géothermique voisine.

De plus, dans le cas des bâtiments avec un sous-sol protégé par une paroi moulée périphérique, l'écoulement naturel de la nappe peut être perturbé entre l'amont et l'aval (figure 3). L'effet barrage ainsi créée influence la vitesse d'écoulement autour des fondations (figure 4) et, par conséquent, le fonctionnement énergétique des parois moulées thermiques.

À noter que, de manière générale, le contexte sera d'autant plus favorable aux géostructures thermiques que la conductivité thermique sera forte, que la vitesse d'écoulement de la nappe sera élevée et que l'état thermique du milieu sera proche de l'état naturel, ou, tout au moins, peu influencé par des facteurs anthropiques.

JUSTIFICATION MÉCANIQUE

Le fait d'extraire ou d'injecter de l'énergie dans le sol via des fondations implique des variations de température dans ces dernières et dans le volume de sol impacté par ces échanges thermiques. Ces variations impliquent de s'intéresser à l'évolution des propriétés mécaniques des formations et des matériaux constitutifs des géostructures

thermiques, mais également à l'impact sur le dimensionnement mécanique de la fondation. Jusqu'à présent, l'évolution des propriétés mécaniques des sols à proximité d'ouvrages énergétiques n'a jamais été constatée en Europe. Les températures imposées dans les ouvrages énergétiques varient entre +1°C et +35°C et restent suffisamment faibles pour ne pas solliciter le comportement visqueux des sols. Il peut donc être admis de ne pas considérer d'évolution des caractéristiques mécaniques intrinsèques des sols et matériaux de construction pour les études des géostructures thermiques. De plus, sous l'effet des cycles successifs de réchauffement et de refroidissement, les géostructures thermiques vont se dilater ou se contracter, en interaction avec les autres éléments structurels (bâtiment supporté par exemple) et avec le sol. Ces variations volumiques vont générer, dans le cas d'une fondation profonde verticale :

- Des déplacements verticaux ;
- Des évolutions de la contrainte verticale, qu'il est primordial d'estimer pour évaluer et garantir la pérennité de la fondation ;
- Une évolution de la mobilisation de la portance. Cette évolution est également susceptible d'être impactée par le caractère cyclique du chargement induit par les variations répétitives de longueur de la fondation et la modification potentielle des propriétés mécaniques de l'interface sol-pieu.

Les mouvements empêchés vont générer des contraintes mécaniques sup-

plémentaires. Néanmoins, les expérimentations réalisées, notamment par l'Isttar, l'Epfl et au Lambeth College, ont montré que les variations de tassements et d'efforts restent faibles et peuvent être appréhendées de façon satisfaisante par les différentes modélisations d'interaction sol-structure couramment utilisées, sous réserve d'intégrer de façon adéquate :

5- Influence de la variation de la température sur l'effort normal et le tassement d'un pieu énergétique.

6- Influence de la rigidité en tête sur les variations d'effort normal et de tassement liées aux variations de température d'un pieu énergétique.

5- Influence of temperature variation on the axial load and subsidence of an energy pile.

6- Influence of head rigidity on variations in axial load and subsidence related to the temperature variations of an energy pile.

→ L'effet des variations de température (figure 5) ;

→ La rigidité en tête de la fondation, traduisant le comportement de la structure portée (figure 6).

Par exemple, si un fluide chaud est injecté dans une géostructure thermique afin d'assurer les besoins en refroidissement du bâtiment (conduisant à l'augmentation générale de la température du pieu), l'effort normal dans la fondation augmente et le tassement en tête diminue. Les phénomènes inverses sont constatés et peuvent être modélisés en cas de diminution de température.

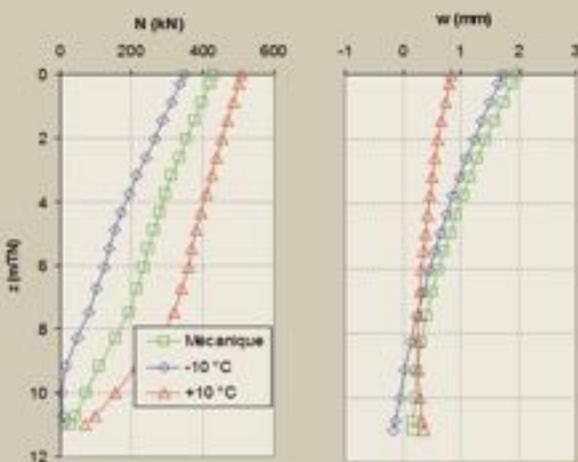
À noter que les points précédents sont valables pour tous les types de géostructures thermiques « profonds ». Cependant, les écrans de soutènement sont susceptibles d'être soumis à des problématiques spécifiques :

- Liaisons à des structures connexes ;
- Objectifs d'étanchéité :
 - De l'écran ;
 - Des structures connexes (radier) ;
- Ouvrage travaillant en traction (cas des parois moulées ou parois de pieux sécants permettant de ménager une excavation à l'abri de la nappe et solidaires d'un radier étanche).

Il faut souligner que les échanges de chaleur n'ont généralement lieu que lorsque l'ensemble de l'ouvrage est en service. Pour les écrans de soutènement, cela correspond aux phases pour lesquelles la stabilité n'est pas la plus critique, du fait de la présence du radier et des différents niveaux de planchers constituant l'ouvrage. Les calculs

INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA TEMPÉRATURE

sur l'effort normal et le tassement d'un pieu énergétique

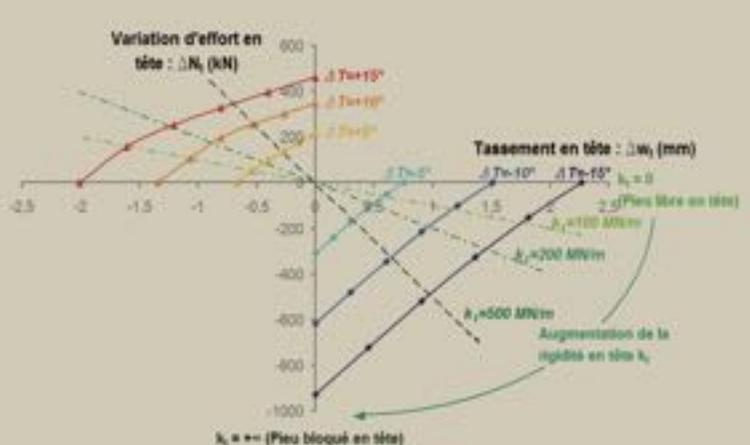


5

© JULIEN HABERT, 2015

INFLUENCE DE LA RIGIDITÉ EN TÊTE

sur les variations d'effort normal et de tassement liées aux variations de température d'un pieu énergétique



6

© JULIEN HABERT, 2015



7

© PHOTOTHÈQUE SYSTRA



8

© PHOTOTHÈQUE SYSTRA

déjà réalisés, tant sur des exemples académiques que sur des cas réels, semblent indiquer que les déformations thermiques ne génèrent pas de modifications sensibles des contraintes horizontales (poussée et butée) et, en conséquence, des efforts dans la paroi (moment fléchissant et effort tranchant). En particulier, les variations des valeurs extrêmes des efforts restent faibles (quelques pourcents).

Concernant le dimensionnement géotechnique, les contraintes d'origine thermique sont considérées comme des charges variables qui peuvent ensuite être intégrées dans les différentes combinaisons de charges (ELU et ELS) afin de déterminer les efforts dans la fondation. Les tassements, quant à eux, sont traités de la même manière que les tassements dus au chargement mécanique. Étant donnée la gamme de température utilisée (+1°C à +35°C), les variations d'efforts et de déplacements supplémentaires ont un impact limité dans le dimensionnement mécanique des fondations.

CONDITIONS DE RÉALISATION ET DE MISE EN ŒUVRE

Comme pour le dimensionnement et la justification mécanique, rajouter des tubes servant à la géothermie dans les fondations ne doit en aucun cas empêcher le respect des bonnes pratiques de mise en œuvre des fondations.

7- Tube géothermique fixé sur une cage d'armatures de paroi moulée énergétique.

8- Manomètre de contrôle.

7- Geothermal tube fastened to a concrete reinforcing cage of an energy diaphragm wall.

8- Monitoring pressure gauge.

Il est impératif de respecter les règles de l'art déjà pratiquées pour les fondations profondes.

En effet, les tubes géothermiques (figure 7) viennent s'ajouter aux armatures et aux éventuels tubes d'auscultation déjà présents dans les fondations. Ils peuvent donc provoquer un mauvais bétonnage et nuire à l'intégrité de la géostructure. Il est donc nécessaire de suivre les règles d'espacements inter-barres classiquement mis en œuvre. D'autant plus que les tubes géothermiques sont fixés soit sur les cages d'armatures, soit sur un dispositif prévu à cet effet pour les fondations non armées.

De ce fait, le nombre de boucles qu'il est possible de mettre en place dépend de la section du pieu ou de l'élément de paroi moulée à équiper. Par exemple, pour un pieu de diamètre 60 cm, il est possible d'installer deux boucles, contre quatre boucles pour un pieu de diamètre 100 cm. Le rayon de courbure maximum des tubes géothermiques, donné par le fournisseur, est également une limitation quant au nombre de boucles à installer.

Un des éléments clés de la mise en œuvre d'une géostructure thermique est le contrôle et la protection pas à pas de l'intégrité du tube géothermique. Ce contrôle est d'abord visuel puis sous pression, à l'aide de manomètres préalablement installés aux extrémités des tubes (figure 8). Ces dernières doivent être protégées afin d'éviter tout dommage, notamment lors de la phase de recépage.

Le respect de ces quelques règles permet de réduire grandement le risque de

tubes défectueux et, ainsi, de préserver le potentiel énergétique de la géostructure thermique. Dans cette même optique, il est conseillé de réaliser plusieurs circuits d'échange et de limiter le nombre de géostructures thermiques en série à cinq unités.

De plus, réaliser les connexions horizontales une fois que l'ensemble des fondations est recépé permet de s'assurer que le dimensionnement thermique final (nombre de géostructures thermiques) correspond bien à ce qui était prévu initialement.

CONCLUSION

Les éléments évoqués précédemment permettent de poser un certain nombre de règles de base qui, si elles sont respectées, doivent conduire à une conception, un dimensionnement et une mise en œuvre en adéquation avec les règlements actuels qui concernent les fondations profondes non-géothermiques. □

INTERVENANTS

- Comité Français de Mécanique des Sols
- Bureau Géotechnique de Syntec-Ingénierie
- Nombre de participants au groupe de travail : 23
- Publication des recommandations : 2^e semestre 2016

ABSTRACT

FRENCH RECOMMENDATIONS FOR GEOTECHNICAL DESIGN AND EXECUTION OF ENERGY GEOSTRUCTURES

YVON DELERABLÉE, ANTEA GROUP - ÉRIC ANTOINET, ANTEA GROUP - JULIEN HABERT, CEREMA - NATHALIE POZZI, SYSTRA - LIONEL DEMONGODIN, EGIS

Energy geostructures are so-called thermoactive foundations. They allow thermal energy to be extracted from or injected into the ground. Since the thermal and mechanical issues for this type of foundation are not covered by the existing regulations (Eurocode 7), technical recommendations have been produced with a view to remedying these shortcomings. For mechanical verification, calculation methods compatible with the customary methods were developed. The theoretical and implementation aspects are also dealt with in these recommendations, which are designed to set out best engineering practice for energy geostructures. □

RECOMENDACIONES FRANCESAS PARA EL DISEÑO GEOTÉCNICO Y LA REALIZACIÓN DE GEOESTRUCTURAS TÉRMICAS

YVON DELERABLÉE, ANTEA GROUP - ÉRIC ANTOINET, ANTEA GROUP - JULIEN HABERT, CEREMA - NATHALIE POZZI, SYSTRA - LIONEL DEMONGODIN, EGIS

Las geoestructuras térmicas son cimentaciones llamadas "termoactivas". Permiten extraer o inyectar energía térmica a nivel del terreno. Los problemas térmicos y mecánicos de este tipo de cimentación no se abordan en los reglamentos vigentes (Eurocódigo 7), de manera que se han elaborado recomendaciones técnicas con objeto de paliar esas lagunas. En cuanto a la justificación mecánica, se han desarrollado métodos de cálculo compatibles con los métodos habituales. Los aspectos teóricos y de aplicación práctica también se tratan en esas recomendaciones, que tienen como objetivo establecer las mejores prácticas en el campo de las geoestructuras térmicas. □



1

© COLAS

WATTWAY : LE 1^{er} REVÊTEMENT ROUTIER PHOTOVOLTAÏQUE AU MONDE

AUTEUR : PHILIPPE RAFFIN, DIRECTEUR TECHNIQUE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT, COLAS

WATTWAY EST UNE INNOVATION FRANÇAISE NÉE AU TERME DE 5 ANNÉES DE RECHERCHES MENÉES PAR COLAS, UN LEADER MONDIAL DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT, ET L'INES, INSTITUT NATIONAL DE L'ÉNERGIE SOLAIRE. EN ASSOCIANT LES TECHNIQUES DE LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE AVEC CELLES DE LA PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE, WATTWAY APORTE UNE NOUVELLE FONCTION À LA ROUTE : FOURNIR DE L'ÉLECTRICITÉ, ÉNERGIE PROPRE ET RENOUVELABLE.

Mi-octobre 2015, Colas a levé le voile sur la route solaire Wattway, un projet qui a mobilisé pendant cinq années les équipes du Campus Scientifique et Technique du groupe Colas en partenariat avec l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). Ce revêtement routier photovoltaïque unique au monde offre une nouvelle fonctionnalité à la route : produire de l'énergie propre et renouvelable. Zoom

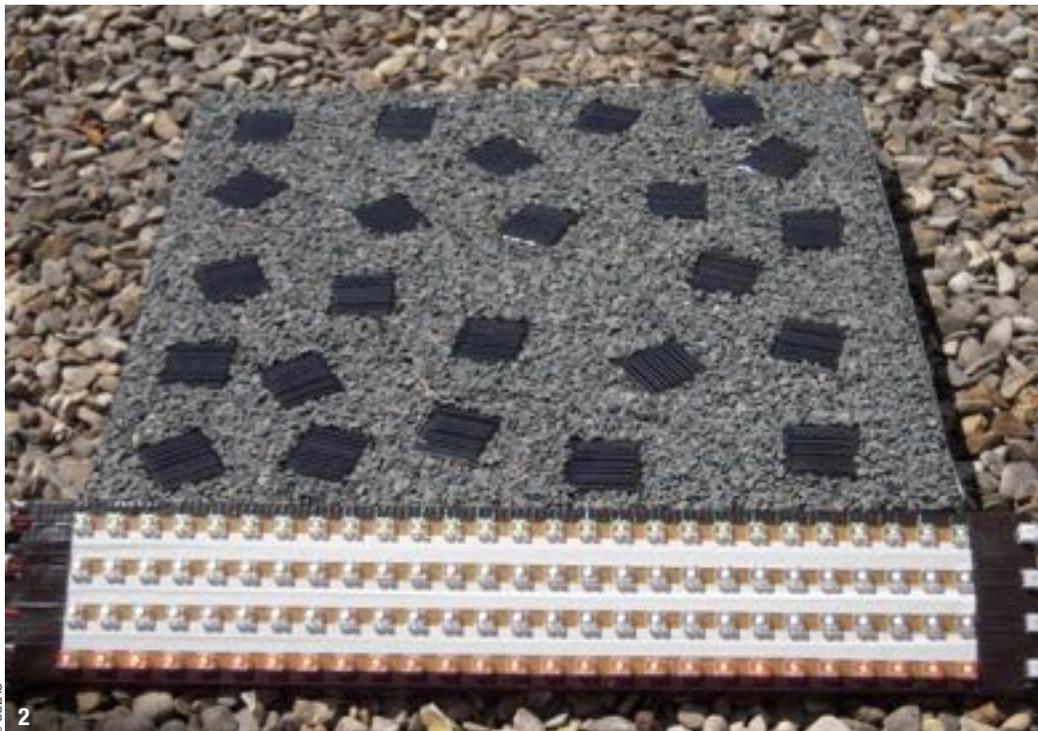
sur une innovation technologique de rupture (figure 1). Retour sur l'histoire du développement d'une solution technologique de rupture qui a permis, en rapprochant deux mondes a priori très éloignés, de doter la chaussée d'une nouvelle fonction dans un objectif de développement responsable, tout en restant compatible avec les outils industriels de construction routière.

WATTWAY : L'HISTOIRE D'UNE INNOVATION DE RUPTURE

« En France métropolitaine, pas moins de six milliards de mètres carrés sont utilisés pour le passage des véhicules, avec entre chaque véhicule un temps suffisant pendant lequel la chaussée regarde le ciel. Pourquoi ne pas imaginer une chaussée qui contribuerait à fournir de l'énergie par elle-même ? »

1 - Vue générale.

1 - General view.



© COLAS
2

Cette question que se pose Jean-Luc Gautier, Directeur du Centre d'Expertise et de Documentation au sein du Campus Scientifique et Technique de Colas, remonte à 2005. Ainsi naît le concept de route solaire : « la route passe 90 % de son temps à regarder le ciel et, quand le soleil brille, elle est exposée à son rayonnement. C'est une surface idéale pour développer des applications énergétiques. »

Dès lors, un projet de recherche est lancé, qui vise à explorer les différentes technologies de récupération d'énergie à partir des routes. Différents proto-

2- Maquette prospective.

3- Route martyre.

4- Démonstrateur face avant texturée.

2- Prospective model.

3- "Route martyre" test section.

4- Textured front surface demonstrator.

types sont réalisés, en laboratoire puis à petite échelle en extérieur. Successivement, les aspects thermique (par circulation de fluide dans la chaussée), thermoélectrique (avec des céramiques sensibles à l'effet Seebeck) et piézoélectrique sont testés, mais sans obtenir de résultats suffisamment satisfaisants en termes de quantité d'énergie récupérable. La voie photovoltaïque n'est pas encore abordée à ce stade.

L'été 2010 marque un tournant fondamental : une maquette d'intégration de mini-cellules sur une surface représentant une chaussée (figure 2) est fabri-

quée pour amorcer les réflexions dans les domaines suivants :

→ **Routier** : Quels matériaux pourront se substituer aux cailloux et au bitume pour assurer la transparence de la face supérieure, permettant aux rayons solaires d'atteindre les cellules, tout en maintenant des caractéristiques d'adhérence et de sécurité d'une chaussée classique ? Comment insérer les cellules dans la chaussée ? Quid de la résistance mécanique des cellules sous le passage des poids lourds et du maintien des propriétés d'adhérence ? Quelles possibilités de réparation de la chaussée, des dalles ? Quid du recyclage de la chaussée et des cellules ?

→ **Photovoltaïque** : Quel matériau utiliser pour les cellules ? Quelle sera l'influence du « taux d'ombrage » dû au passage des véhicules sur les performances énergétiques ? Quelle sera l'évolution des performances électriques sous l'effet de l'encrassement, des rayures ou de l'usure des cellules ? Quelle sera la résistance à l'humidité des cellules ? Quel sera l'impact de la température de la chaussée sur les performances énergétiques ?

→ **Ingénierie électrique** : Quid de la connexion des cellules entre elles et vers le réseau ? Quid de la résistance à l'humidité des connexions et du réseau de raccordement ? Quid de la sécurité électrique vis-à-vis du vandalisme, ou de l'endommagement consécutif à un accident de circulation qui viendrait aggraver mécaniquement les dalles ? ▷



© COLAS
3



© COLAS
4



5
© COLAS



6
© COLAS

Des pages et des pages de questions, pour lesquelles aucun début de réponse n'est disponible, et qui seront la feuille de route décrivant les freins à lever pour les 5 années qui suivront dans le cadre du projet de recherche baptisé « Solar Road ».

2011 : « Solar Road » : un projet qui, au-delà de la route, comprend une composante connue dans le groupe Colas : les panneaux photovoltaïques souples en couche mince à base de silicium amorphe, utilisés en toiture des bâtiments à ossature métallique par la filiale Smac. Mais une expertise scientifique externe devait être mobilisée, basée sur le concept d'*open innovation*, largement répandu en innovation. Et c'est naturellement que Colas est entré en contact avec les experts de

l'Institut National de l'Énergie Solaire au sein du CEA Tech qui, après avoir exprimé des doutes sur la faisabilité du projet, se sont très rapidement approprié le concept. S'ensuit la création d'un laboratoire commun Colas-CEA, mutualisant les expertises autour du projet « Solar Road »

Une « Route martyre » à base de panneaux souples collés au bitume chaud et soumis à de multiples sollicitations est testée : passage de piétons, circulation de véhicules légers puis lourds, freinages, roulage sur des dépôts de terre puis de gravillons (figure 3). Durant ces premiers essais, les performances de production électrique sont enregistrées et ne montrent aucune dégradation notable. La faisabilité était donc démontrée.

5- Démonstrateur version cristallin.

6- Tests mécaniques sous trafic de bus.

7- Principes de connectique.

5- Démonstrateur, cristalline version.

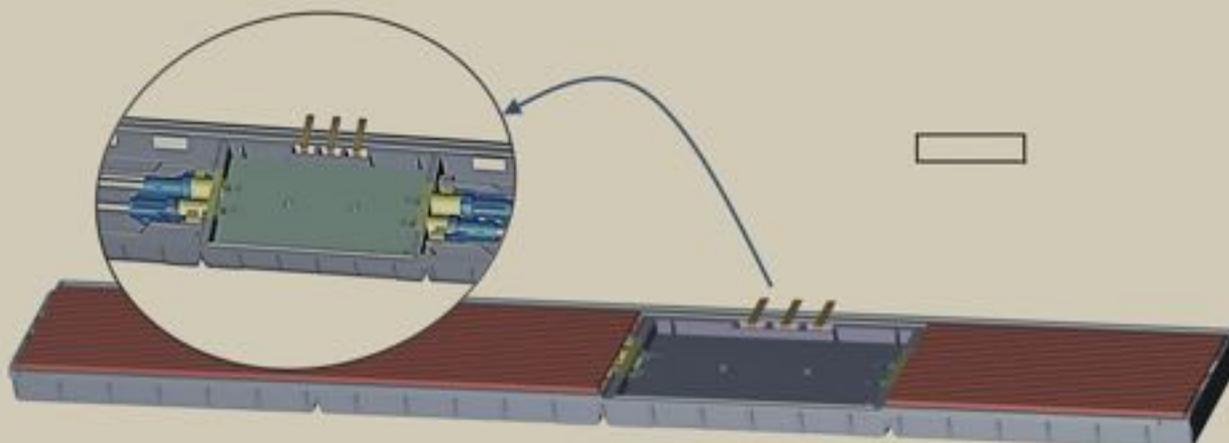
6- Mechanical tests under bus traffic.

7- Connection techniques.

2012 : L'orientation prise consiste à adapter les dalles qui ont donné satisfaction du point de vue de la tenue mécanique sur la « Route martyre » en dotant la face supérieure de propriétés d'adhérence permettant aux usagers, véhicules ou piétons, de se déplacer en toute sécurité, tout en garantissant le passage des rayons lumineux jusqu'aux couches de silicium. Le défi est énorme, la surface traditionnelle des dalles étant généralement recouverte d'un revêtement téflonné, totalement antagoniste des caractéristiques d'adhésivité recherchées !

De nombreux produits et technologies sont testés, pour aboutir à la sélection d'une résine translucide et de grains de verre d'une granulométrie précise, dont les performances en absorption sont

PRINCIPES DE CONNECTIQUE



7
© COLAS

vérifiées, notamment après de multiples cycles de vieillissement.

Au-delà du caractère translucide, sont testées en laboratoire les caractéristiques mécaniques des dalles : adhérence, orniérage, trafic, performances électriques.

2013 : Les premiers éléments de réponse sont apportés et validés par un démonstrateur (figure 4) soumis au trafic, d'une puissance de 3 kWc à base de panneaux souples en couches

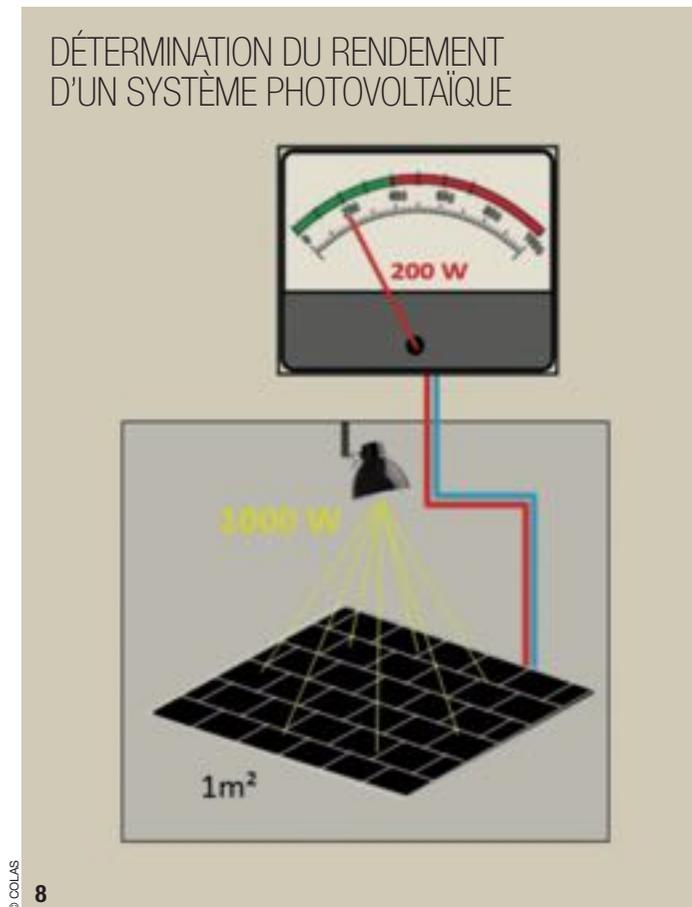
8- Détermination du rendement d'un système photovoltaïque.

9- Application de la colle sur le support.

8- Determining the efficiency of a photovoltaic system.

9- Applying adhesive on the substrate.

DÉTERMINATION DU RENDEMENT D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE



© COLAS

minces de silicium amorphe, avec une face avant texturée pour assurer à la fois la transmission des rayons lumineux et garantir un niveau d'adhérence satisfaisant pour véhicules et piétons.

2014 : Le marché des cellules photovoltaïques subit le déferlement des modules de fabrication chinoise, dont les prix de vente extrêmement bas conduiront la grande majorité des fournisseurs de panneaux en couche mince, dont trois fournisseurs majeurs, à déposer leur bilan, tels Unisolar, Solopower ou Solyndra aux États-Unis qui engloutit 500 millions de dollars de subventions fédérales.

L'impact sur « Solar Road » est fondamental ; le projet est réorienté vers la technologie des cellules en silicium cristallin (figure 5), permettant de maîtriser les approvisionnements. Mais ces cellules très fines (200 microns), donc extrêmement fragiles, ont imposé de développer une structure de protection mécanique leur permettant de résister au trafic lourd, aboutissant à la réalisation d'un second démonstrateur.

2015 : Alors que se précise le lancement public de Wattway, nouveau nom retenu pour la Route Solaire, deux nouveaux démonstrateurs sont construits. ▷



© COLAS



10

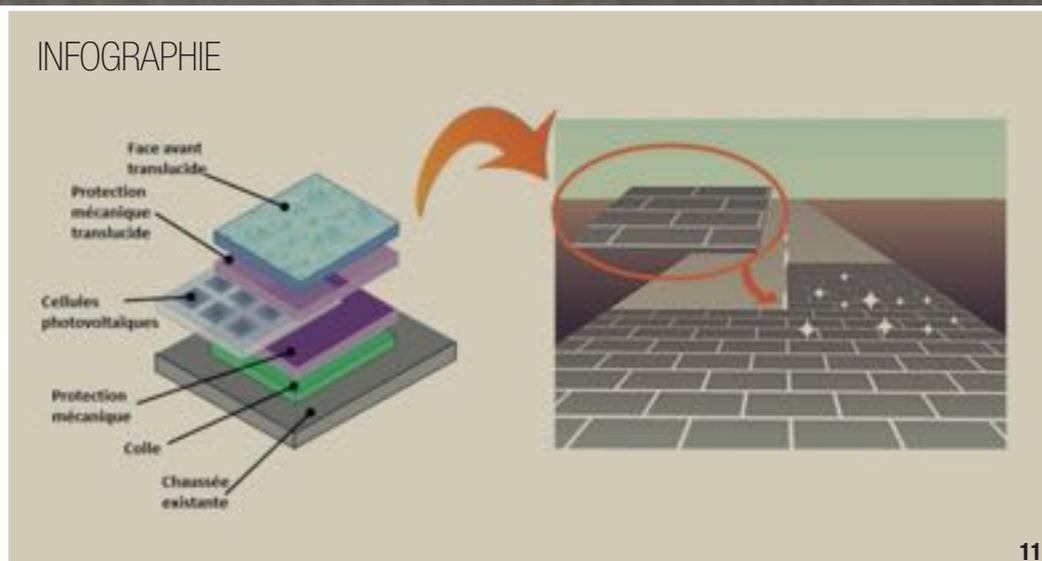
© COLAS

La structure des dalles est à nouveau optimisée, tant mécaniquement que d'un point de vue économique.

De nombreux essais ont permis d'en vérifier les performances mécaniques, telles que la résistance aux chocs lors de la chute de masses calibrées depuis une hauteur de 120 cm, la résistance aux agressions chimiques de produits susceptibles d'être déversés par les véhicules (huiles, essence, liquide de freins, acides, ...), ou l'endurance, d'une part en soumettant des échantillons à un essai prolongé d'un million de cycles sur les ornières du CST (alors que les enrobés sont traditionnellement testés sur 30 000 cycles) et, d'autre part, en faisant circuler une noria de bus pendant plusieurs jours sur les dalles posées au milieu du parking (figure 6). En parallèle, des essais de comportement électrique et l'analyse des modes de défaillance potentiels sont menés par les spécialistes de CEA Tech et permettent de définir les préconisations de sécurisation des dalles.

L'absence de normes spécifiques contraint à adopter des systèmes redondants de sécurité, basés sur des cartes électroniques permettant d'assurer le contrôle à distance des modules et leur mise en court-circuit en cas de problème électrique (figure 7).

2016-2017 : Le statut de « technologie prototype validée » atteint, les deux prochaines années vont permettre de développer Wattway sous la forme de chantiers d'application sur des surfaces limitées à 100 m², tant en France qu'à l'international, auprès d'institutions publiques ou entreprises privées pionnières, souhaitant participer au lancement de cette innovation dans le cadre de la politique de transition énergétique. L'objectif est simple : valider le procédé, au-delà des phases de tests en laboratoire et des démonstrateurs prototypes, dans chacun des domaines d'usage souhaités par les clients pionniers (conditions de trafic,



11

© COLAS

de charge, d'effets climatiques) et ce, à échelle réelle.

C'est à partir de la centaine de chantiers d'application réalisés que seront validées, sur la base d'une technologie éprouvée et maîtrisée, les solutions les plus pertinentes pour le marché et que seront bâties les offres pour la phase de commercialisation, courant 2018.

10- Vue transversale de la dalle Wattway.

11- Infographie.

10- Transverse view of the Wattway slab.

11- Digital images.

Témoignage d'Alain Leboeuf, Député de la Vendée, Président du SyDEV (Syndicat départemental d'énergie et d'équipement de la Vendée), Président de la Commission Infrastructures, Réseaux et Mobilités du département : « Le SyDEV est engagé depuis longtemps dans la production d'électricité à partir de sources renouvelables, notamment photovoltaïques, et dans la mobilité durable. Il a d'emblée souhaité être pionnier sur le projet Wattway. Dans cette opération, le SyDEV a accompagné le Département et la société Colas sur les aspects électriques. Il a participé à la définition des travaux de raccordement des installations au réseau de distribution, mis en place la borne de recharge pour la mobilité électrique. Un panneau d'affichage permettra de communiquer sur les performances des installations et sensibiliser nos concitoyens sur l'émergence de ces technologies de pointe qui s'installent sur nos territoires. Le choix de Colas de développer, en avant-première, cette innovation sur notre territoire est la reconnaissance de la capacité de nos collectivités de s'engager résolument dans l'innovation. C'est cette capacité à innover qui permet à notre département de tenir les tous premiers rangs dans le domaine de l'énergie et de la mobilité durable. »

LA TECHNOLOGIE DU PHOTOVOLTAÏQUE NOTIONS DE PUISSANCE ET DE RENDEMENT

Par opposition à un équipement de consommation d'énergie électrique traditionnel, dont la puissance utilisée est exprimée en watt (W), l'unité utilisée dans le domaine du photovoltaïque, en tant qu'organe de production est le watt-crête (Wc). Elle traduit la capacité de production de puissance d'une cellule ou d'un panneau dans des conditions d'utilisation normalisées, à savoir 1 000 W/m² d'irradiance à une température de 25°C. Le rendement est le ratio entre la puissance électrique produite et la puissance solaire reçue sur 1 m². Par exemple, un panneau d'1 m² qui produit 200 W quand le soleil émet 1 000 W/m², soit un rendement de 20%, aura une puissance de 200 Wc (figure 8).

DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DISPONIBLES

Il existe 4 familles de technologies :

→ La première, la plus répandue, concerne les technologies à base de silicium cristallin. Elle représente plus de 90% du marché avec des

rendements en laboratoire compris entre 20 et 27 % ;

- La deuxième famille concerne les couches minces (silicium amorphe, CIGS, CdTe) avec un rendement en laboratoire entre 13 et 23 % ;
- Les technologies multi-jonctions constituent la troisième famille avec des rendements record entre 26 et 46 % ;
- Enfin, les technologies émergentes (organique, perovskite, ...) ont des rendements compris entre 9 et 20 % avec des courbes d'apprentissage rapides.

LA TECHNOLOGIE WATTWAY

Les dalles Wattway comprennent des cellules photovoltaïques encapsulées dans un substrat multicouche, composé de résines et de polymères.

Ces cellules captent l'énergie solaire au travers d'une très fine feuille de silicium polycristallin permettant de produire de l'électricité. Connectées à un boîtier latéral en sous-face intégrant les composants de sûreté électrique, les dalles sont adaptables aux routes du monde entier et capables de supporter la circulation de tout type de véhicule, y compris les poids lourds.

Les dalles Wattway sont fabriquées industriellement puis collées directement sur la chaussée, sans travaux de génie civil (figure 9).

Épaisses de quelques millimètres, les dalles résistent pourtant aux sollicitations mécaniques et thermiques et offrent des caractéristiques d'adhérence de surface similaires aux routes classiques (figure 10).

En termes d'usage, on peut citer la capacité de production d'énergie électrique pour l'éclairage public, le mobilier urbain, les bornes de recharge des véhicules, des bâtiments publics, des habitations, la contribution à l'ob-



12- Projet Vendéspace achevé.

12- Completed Vendéspace project.

tention du label BBC (Bâtiment Basse Consommation) pour les logements. Un kilomètre de route équipée de dalles Wattway pourra alimenter l'éclairage public d'une ville de 5 000 habitants. Plus généralement, cette technologie est particulièrement bien adaptée aux applications *smart grid* et aux circuits courts de production électrique (figure 11).

LE PREMIER CHANTIER D'APPLICATION

Le département de la Vendée a accueilli le premier chantier d'application Wattway fin mai 2016.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la politique de transition énergétique et de soutien au développement de la voiture électrique. Wattway est une solution qui s'intègre dans le plan « Vendée Énergies Nouvelles » qui vise trois objectifs : 50 % de l'énergie électrique consommée en Vendée sera produite de manière renouvelable à partir de 2025 (contre 10 % aujourd'hui), une forte sensibilisation des Vendéens aux économies d'énergie et le développement de l'écomobilité.

Ce premier chantier d'application va permettre d'expérimenter l'un des usages de Wattway. Composé de 42 dalles recouvrant 50 m² du parking de Vendéspace à Mouilleron-le-Captif, cet équipement, dédié au rechargement des véhicules électriques, produira 6 300 kWh/an (figure 12).

CONCLUSIONS

Wattway a nécessité plus de 5 années de recherches en partenariat pluridisciplinaire pour aboutir à une innovation de rupture majeure : donner une nouvelle fonction à la route, sans générer de travaux de renforcement des chaussées existantes, et ce, tout en permettant un trafic poids lourd.

Cette technologie devient une des briques du mix énergétique sans empiéter sur les surfaces agricoles ni impacter les paysages naturels.

Elle répond ainsi aux politiques environnementales relatives à la transition énergétique, qui sont de plus en plus développées sur le territoire national mais également par-delà nos frontières. □

ABSTRACT

WATTWAY: THE FIRST PHOTOVOLTAIC ROAD SURFACING IN THE WORLD

PHILIPPE RAFFIN, COLAS

"Roads spend 90% of their time looking at the sky". It is based on this simple observation that Colas, in partnership with the National Institute of Solar Energy, started R&D work in 2010 to create a world-first innovation. The Wattway solar road, using a process combining the characteristics of a pavement with those of solar panels, is laid over existing road infrastructure, is resistant to road traffic, and thus provides the road with a new function: producing clean, renewable electric power. Work has begun on the first application sites, in order to validate its fields of use before starting marketing in 2018. □

WATTWAY: EL 1^{er} REVESTIMIENTO VIAL FOTOVOLTAICO DEL MUNDO

PHILIPPE RAFFIN, COLAS

"La carretera pasa el 90% de su tiempo mirando el cielo". A partir de esta simple constatación, Colas, en colaboración con el Instituto Nacional francés de Energía Solar, inició en 2010 unos trabajos de I+D que han dado origen a una innovación mundial. La carretera solar Wattway, procedimiento que combina las características de una calzada con las de los paneles solares, se instala sobre las infraestructuras viales existentes, es capaz de soportar el tráfico viario y confiere una nueva función a la carretera: producir energía eléctrica limpia y renovable. Ya han comenzado las primeras obras de prueba para validar los ámbitos de utilización previamente al lanzamiento de su comercialización, en 2018. □

GRAND PARIS : L'ÉNERGIE D'UN TERRITOIRE

AUTEURS : OLIVIER DE CHÂLUS, CONDUCTEUR D'OPÉRATION DU SECTEUR DE CRÉTEIL, GROUPEMENT ARTEMIS (AMO GÉNÉRALE DE LA SGP), SOCIÉTÉ ARCADIS - CRISTINA VALEAN, DIRECTRICE DU PARTENARIAT INNOVATION SGP-EFFICACITY

LE PROJET DE CONSTRUCTION DES LIGNES 15, 16, 17 ET 18 DU MÉTRO DE PARIS S'INSCRIT DANS UNE RÉORGANISATION DE L'AGGLOMÉRATION CAPITALE DANS SON ENSEMBLE. CETTE REFORTE RÉPOND À DES ENJEUX CYCLIQUES QUI, DEPUIS LE XIII^e SIÈCLE, PROVOQUENT PAR À-COUPS LE DÉVELOPPEMENT DE NOMBREUX PARAMÈTRES URBAINS, DE L'ORGANISATION ADMINISTRATIVE AUX COMPOSANTES LES PLUS TECHNIQUES, LE TRANSPORT NOTAMMENT. DANS CE CONTEXTE EXTRÊMEMENT DYNAMIQUE, PENSER CE PROJET EXCLUSIVEMENT « MÉTRO » SERAIT UN NON-SENS. L'ÉNERGIE EST UN BON EXEMPLE DE LA FAÇON DONT ON PEUT SORTIR DU CADRE.



© OLIVIER DE CHÂLUS

Si le nom d'Hausmann évoque de façon indélébile l'apogée du paysage parisien, derrière ce nom se cache une redéfinition urbaine généralisée de l'imposant Paris de la fin du XIX^e siècle, en combinant des intérêts privés et publics. Le préfet de la Seine sait que l'avenir de la ville nécessite une infrastructure technique de qualité et, alors qu'il n'a pris ses fonctions que depuis une année, il présente en 1854 son projet de refonte du réseau d'adduction d'eau. Pour lui, le volume distribué par habitant est un indicateur fiable du niveau de développement d'une cité. Logiquement, les réflexions sur l'assainissement en découlent et, comme par effet domino, la démarche hygiéniste se met en place : destruction de quartiers insalubres, construction de larges avenues aérées, parcs urbains, etc. Ces mesures facilitent la circulation,

de nouveaux modes de transports sont envisagés et la petite ceinture voit le jour. Les projets s'enchaînent (figure 1). Un demi-siècle plus tard, à la veille de la première guerre mondiale, la percée du boulevard Raspail marque la fin des travaux haussmanniens. L'homme n'est plus préfet depuis la fin du second empire mais la restructuration qu'il avait initiée a perduré. Le rapport de la commission Picard, qui analysa l'impact de la crue de 1910, fait état d'une œuvre urbaine très complète : les réseaux de métros de la CMP (Compagnie du Métropolitain Parisien) et du Nord-Sud, l'électricité, la télégraphie, la téléphonie, l'air comprimé, le gaz de ville. Tous ces éléments découlent d'un même élan et ils composent la même ville ; pour cette raison ils doivent également être considérés comme haussmanniens.

1- Avenue de l'Opéra, Paris. Symbole des travaux Haussmanniens son ouverture a pourtant débuté plus d'une demi-décennie après qu'Hausmann ait quitté ses fonctions.

1- Avenue de l'Opéra, Paris. Symbol of the Haussmann works. Yet it was opened more than half a decade after Haussmann had retired.

Cette mutation avait en réalité débuté dix ans avant l'arrivée d'Hausmann, lorsque l'enceinte d'Adolphe Thiers fractura les communes périphériques en étendant l'intramuros jusqu'aux limites réelles de la ville. Si ces nouvelles limites ne seront officialisées qu'en 1860, avec l'extension du territoire communal de Paris et son redécoupage en vingt arrondissements, les faits sont là : Paris avait déjà débordé et l'haussmannisation était jouée dès 1840.

La ville de Paris a connu au long de son histoire d'autres mutations similaires. À la charnière des XII^e et XIII^e siècles, et pour la première fois à Paris, l'évêque Maurice de Sully et les rois, de Philippe Auguste à Saint Louis, réorganisèrent une ville dont la population débordait soudainement des limites de son mur antique. La gouvernance de la cité est repensée, les voiries sont pavées, de

2- Vestige de l'enceinte de Philippe Auguste, rue des Jardins de Saint Paul. Construite entre 1195 et 1215 elle marque les limites de l'expansion urbaine de cette époque, qui seront par la suite dépassées.

3- Plan du réseau futur, en développement sous maîtrise d'ouvrage de la Société du Grand Paris.

2- A relic of the Philippe Auguste enclosure, rue des Jardins de Saint Paul. Built between 1195 and 1215, it marked the boundary of urban expansion at that time, which would subsequently be exceeded.

3- Plan of the future network, undergoing development for contracting authority Société du Grand Paris.



© OLIVIER DE CHÂLUS

nouvelles rues et de nouveaux ponts sont construits, etc. Citons encore l'exemple des mutations de la fin du XVIII^e et du début du XIX^e, avec la construction de la nouvelle enceinte des fermiers généraux, la réorganisation du port, de ses moulins, la

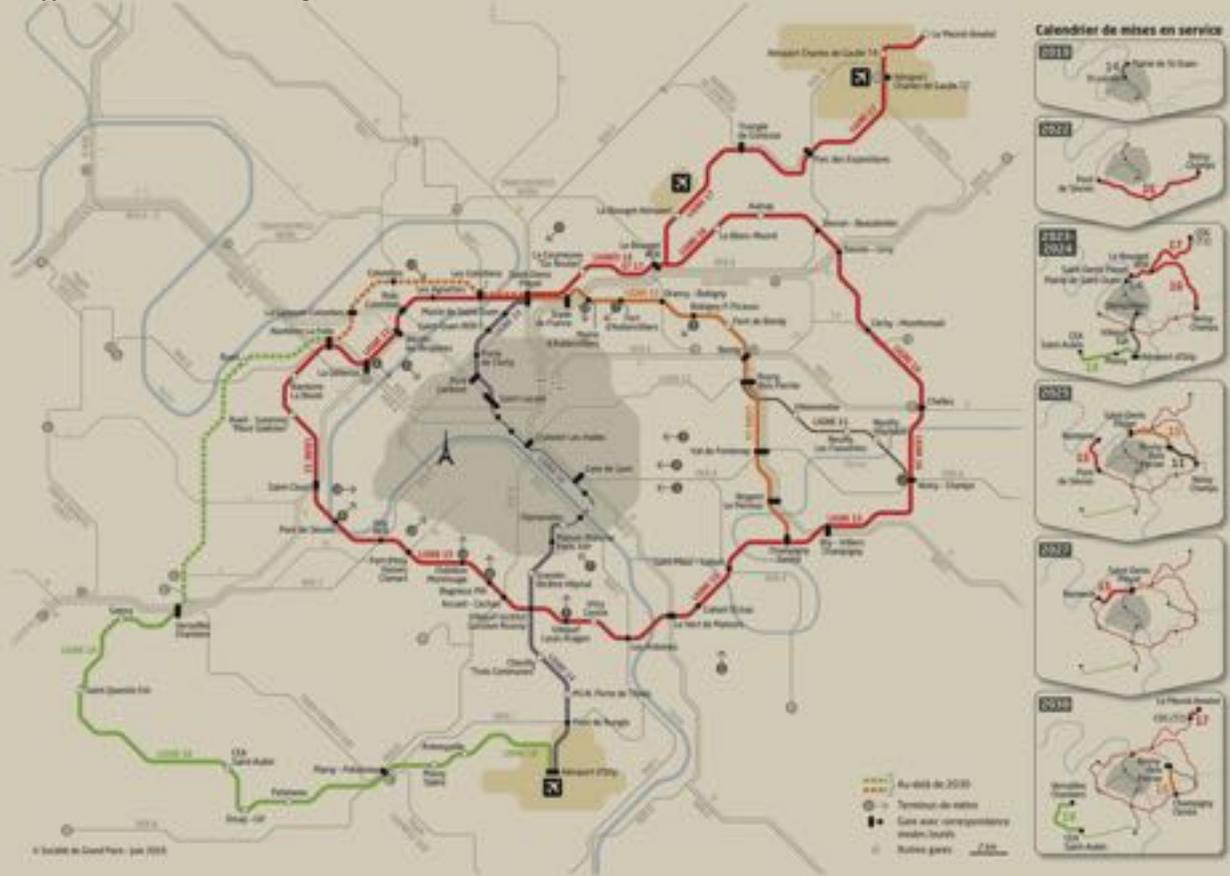
construction de nouvelles rues et du célèbre canal Saint-Martin. La structure administrative de la ville est à cette occasion, une fois encore, redéfinie (figure 2).

Quel lien avec le Grand Paris ? En réalité, le mécanisme de ces mutations

est imperturbablement le même : sous une poussée démographique qu'elle ne peut contenir, la ville se réorganise, s'embellit et ses modes de circulation se fluidifient. Voilà la définition que nous pourrions donner à l'haussmannisation. C'est ce que nous vivons aujourd'hui : l'inadéquation entre les limites communales de Paris et les limites de son agglomération, six fois plus grosse, a conduit à la création de la Métropole du Grand Paris, en 2016, et ses Établissements Publics Territoriaux. Se met ainsi en place une nouvelle organisation administrative du cœur urbain parisien et ses 6,9 millions d'habitants. Parallèlement, un développement d'infrastructure à grande échelle voit le jour. La Société du Grand Paris (SGP) en est l'acteur principal et le Grand Paris Express (GPE), dont le montant d'investissement s'élève environ à 30 milliards d'euro, en est le principal objet. Mais si c'est d'un métro dont la SGP et pilote, elle saisit aussi les opportunités qui se présentent de déploiement d'un réseau numérique de grande ampleur ou de développement de synergies énergétiques. ▷

PLAN DU RÉSEAU FUTUR

en développement sous maîtrise d'ouvrage de la Société du Grand Paris



© SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

3

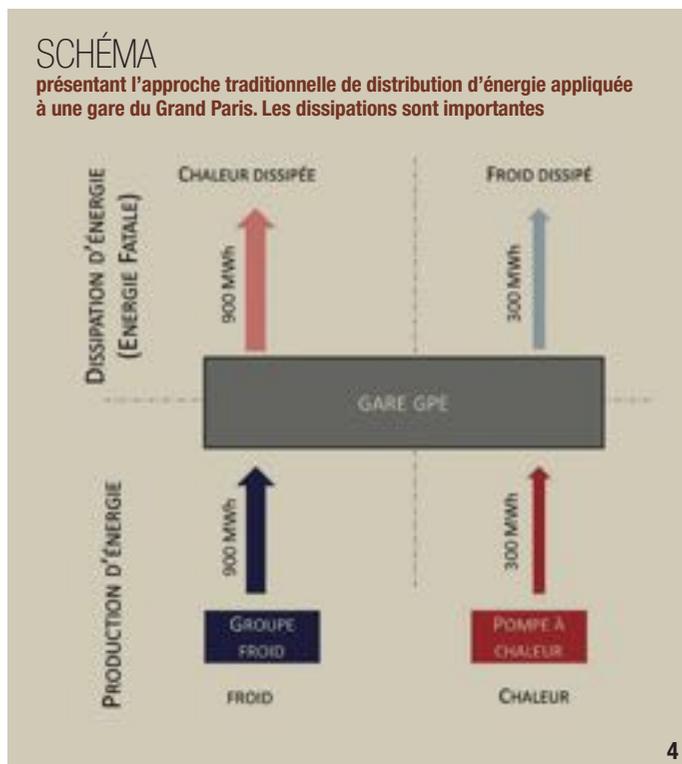
C'est enfin et surtout un renouveau urbain avec de grands projets architecturaux, de nouveaux quartiers, de nouveaux espaces commerciaux, de nouvelles interconnexions et des modes de transports repensés.

Rationaliser, fluidifier, embellir Paris : nous vivons une nouvelle haussmannisation. Depuis la fin du XIX^e, jamais ne s'est présentée à Paris l'occasion de penser les choses à si large échelle. Jamais un projet n'avait touché une telle diversité de territoires, de population, que le projet de la SGP et le monde de la construction dans son ensemble et les grandes institutions partagent leurs savoirs faire pour concevoir en commun un projet d'avenir.

Les historiens des techniques qui ont travaillé sur le développement des civilisations ont identifié que pour qu'une innovation puisse aboutir trois conditions sont requises : l'existence de groupes prêts à envisager les innovations sérieusement ; que ce développement réponde à des enjeux sociaux forts ; et enfin qu'il s'appuie sur des moyens financiers, techniques et humains à grande valeur ajoutée. La SGP répond au premier de ces points en impulsant le dynamisme de ce projet hors du commun, la population francilienne est la raison même de ce projet et, enfin, les compétences fédérées par la SGP et l'implication des pouvoirs publics dans le financement complètent cet ADN qui donnera naissance au Grand Paris Express et à la ville de Paris des siècles à venir (figure 3).

Concrètement, comment se structure cet ADN ? Pour concevoir chacun des tronçons du Grand Paris Express, un contrat de maîtrise d'œuvre de grande ampleur est mis en place, passé à des groupements de bureaux d'études et de cabinets d'architecture. Au plus fort du projet, une vingtaine de contrats de ce type seront actifs. Bien qu'essentiels, ces contrats ne suffisent pas car une mise en cohérence transverse au découpage géographique est également nécessaire. S'ajoutent donc autant de maîtres d'œuvre traitant des aspects allant du système de transport au design ou à l'information voyageur. En miroir des contrats de maîtrise d'œuvre, viennent ensuite les contrats d'AMO pour coordonner et piloter les études. Enfin, un partenariat d'innovation a été signé avec Efficacy.

À des stades d'avancement différents, les études débutent sur la ligne 15 Est alors que les premières phases d'exécution commencent ailleurs.



4- Schéma présentant l'approche traditionnelle de distribution d'énergie appliquée à une gare du Grand Paris. Les dissipations sont importantes.

4- Diagram showing the conventional energy distribution approach applied to a station of the 'Grand Paris' project. There are significant energy losses.

5- Smart management of a station.

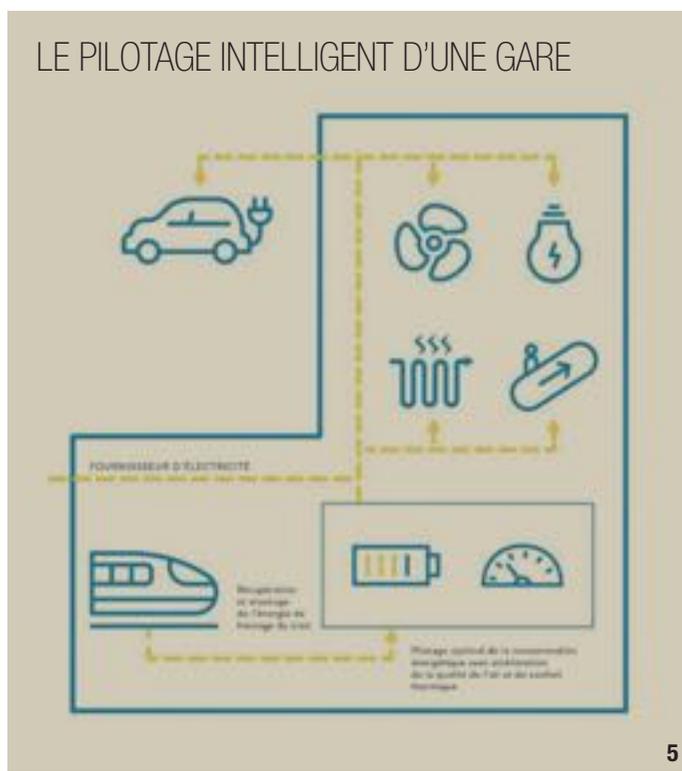
Nous sommes aujourd'hui entre mille et deux mille à travailler quotidiennement pour le GPE. Le projet est donc une énorme masse de matière grise en coactivité, au cœur de laquelle se trouvent la maîtrise d'ouvrage et l'AMO Générale (Artelia, Arcadis, Bg), principaux coordinateurs du projet.

Soyons honnêtes, avec tant d'acteurs et un tel enchevêtrement d'intérêts, le quotidien du projet n'est pas toujours idyllique. La recherche permanente du consensus semblerait constituer le fil d'Ariane pour voir un jour « le bout du tunnel ». Pourtant, nous sommes profondément conscients que les décisions prises

dessinent d'une part l'Île-de-France des deux prochains siècles et qu'elles posent de nouveaux principes pour les réseaux de transport qui seront développés à l'avenir.

Les modifications des calendriers de mise en service des lignes 16 et 17 pour étayer la candidature aux JO de Paris pour 2024 ajoutent autant de contraintes que de valeur au projet. Vu les calendriers très contraints, les études de génie civil ont été découplées des études de second œuvre. Sur la ligne 15 Sud, les études de second œuvre et de lots techniques sont en cours, alors que les consultations de génie civil sont en cours, que les locaux et les trémies sont figés, et que les travaux de la gare de Fort-d'Issy-Vanves-Clamart commencent, en avance de phase, dès ce mois-ci. Bien sûr, côté aménagement, nous n'en sommes plus au stade de la feuille blanche, les grands principes sont déjà arrêtés. Mais les recalages sont perpétuels dans un contexte déjà figé.

La maîtrise d'ouvrage récupère progressivement les résultats des études de trafic, étoffe progressivement la liste des fonctionnalités que doit satisfaire un réseau de transports de nouvelle génération, définit ses exigences de maintenance et demande les ajustements de programme que les premières étapes d'un projet de cette envergure génèrent.



POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DES GARES DE LA LIGNE 15 SUD



© EFFICACITY - SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

6

La SGP affine par ailleurs avec le STIF et les collectivités les exigences d'intermodalité et lance ses acquisitions foncières.

Comment éviter alors que ce morcellement des études, motivé par des enjeux de maîtrise des délais et plus largement de conduite de projet, se fasse au détriment de la performance du réseau ? Le cas de l'énergie est particulièrement une bonne illustration du profit que l'on tire, malgré tout, de cette situation complexe.

Soulignons tout d'abord que chaque décision, de chaque acteur du projet, a une incidence sur les consommations d'énergie. La vitesse des trains consomme, le choix d'un appareil de voie consomme ; les exigences de disponibilité du réseau, les modes de fonctionnement dégradés consomment ; le foncier et la répartition des équipements d'énergie de traction consomment. En gare, les façades de quai toute hauteur font perdre les bénéfices thermiques classiques de l'effet piston et les conditions de confort, l'éclairage, l'affichage dynamique, la performance thermique des matériaux ou même leur couleur consomment de l'énergie. Bien que les préconisations techniques ou programmatiques soient inlassablement réinterrogées pour optimiser chaque kilowatt, les surfaces des locaux sont déjà très optimisées, comme dans les gares courtes et peu profondes des lignes 16 et 17. A priori les marges d'innovation semblent minces sur ce projet où les défis sont déjà innombrables.

La performance vient donc d'ailleurs, en considérant les choses plus largement qu'il n'y paraît : le projet reste

6- Potentiel géothermique des gares de la ligne 15 sud.

7- Illustration d'une paroi moulée thermoactive.

6- Geothermal potential of the stations of South line 15.

7- Illustration of a thermoactive diaphragm wall.

propice à l'innovation parce qu'il est plus large qu'un simple projet d'ingénierie. Prenons le cas de la thermique. Efficacity, conseil de la maîtrise d'ouvrage, a ré-analysé les options techniques proposées et ouvert de nouvelles pistes de réflexion pour l'écoconception et pour favoriser la transition énergétique et l'insertion des gares dans leur territoire. L'AMO Générale a ensuite coordonné les études techniques menées par les maîtres d'œuvres qui mettent en musique ces solutions. Des principes sont enfin en train d'être établis par les équipes de la SGP pour

valoriser au maximum les énergies dites fatales, c'est-à-dire rejetées au milieu naturel.

Explication : l'approche conventionnelle voudrait, par exemple, que pour combattre les effets thermiques issus d'un poste de redressement électrique soit produit du froid en proportion de la chaleur dégagée dans ce local.

L'hiver, de la chaleur est en plus produite pour garantir la température minimale de fonctionnement de certains équipements ou la température de confort de certains espaces.

Les productions de froid ou de chaud étant indépendantes, elles rejettent dans milieu naturel du chaud pour la première et du froid pour la seconde. Très schématiquement, une gare dont les consommations hivernales seraient de 300 MWh chaud et 900 MWh froid consommerait 1 200 MWh d'énergie électrique (au rendement près des installations de production), rejetés en proportion, in fine, à l'extérieur.

Multipliez pour les lignes 15, 16 et 17 ce principe par 50 gares, 4 sites de maintenance et 154 ouvrages-annexes et vous obtenez une aberration énergétique, qu'on ne peut envisager à l'échelle d'un réseau de cette ampleur (figure 4).

L'approche énergétique du GPE est donc plus astucieuse et innovante, car la SGP a intégré le quartier de gare dans sa réflexion énergétique.

Des solutions de mutualisation des besoins, basées sur les temporalités d'usage, sont alors apparues et ont été approfondies avec les parties prenantes.

La gare devient un « hub énergétique » pour le quartier.

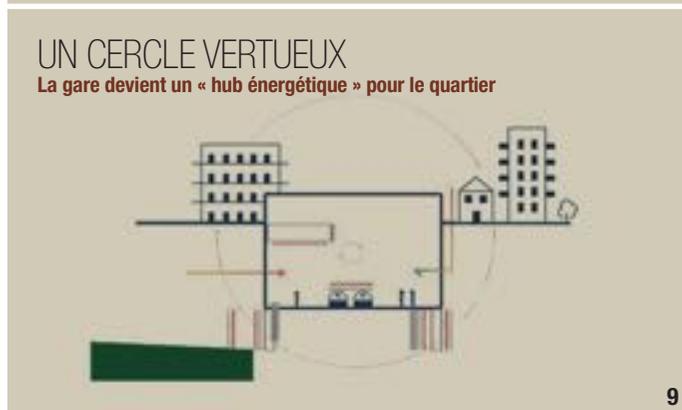
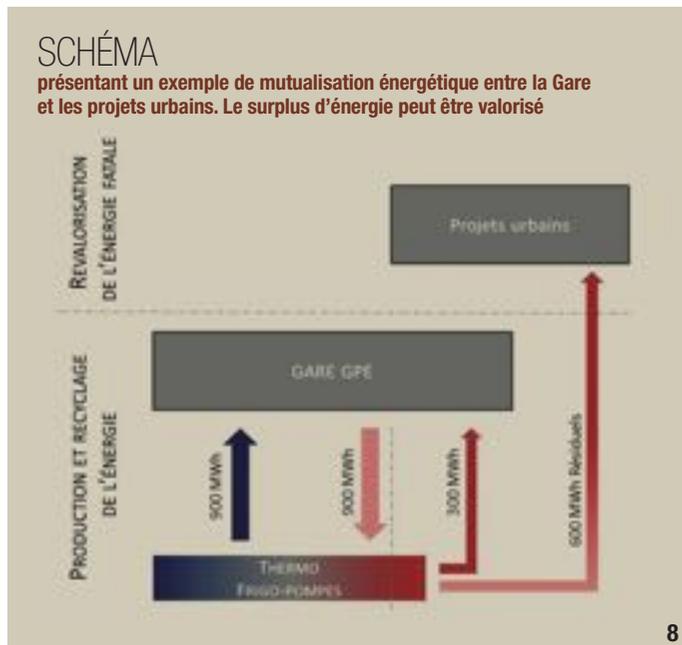


7 © EFFICACITY

Précisément, l'approche SGP-Efficacy repose tout d'abord sur l'éco-conception des gares, afin de gagner en efficacité et en sobriété énergétique, ainsi que sur l'éco-conduite des trains. Ensuite, les axes approfondis sont le transfert de l'énergie fatale et la mise en place d'énergies renouvelables décarbonnées, plutôt que sur la production d'énergie à base de combustibles conventionnels (figure 5).

La géothermie constitue à ce titre une richesse énergétique du sous-sol, révélée lors des études géotechniques effectuées dans le cadre des missions de sondages préalables. Efficacy a identifié le potentiel spécifique pour chaque gare et analysé l'adéquation entre la ressource et les besoins de chaque gare et des projets connexes associés. Ainsi, ont été identifiées plusieurs gares de la ligne 15 Sud qui présentent un potentiel géothermique très intéressant (figure 6). Sur la base des premiers calculs technico-économiques, la SGP souhaite valoriser, au travers des parois moulées thermoactives, cette énergie renouvelable et en faire profiter la gare et son quartier (figure 7).

Concernant les énergies fatales, au lieu de considérer le poste de redressement évoqué ci-dessus comme gros consommateur de froid rendant nécessaire d'évacuer les calories, nous pouvons le considérer comme une unité de production de chaleur à part entière : extraire cette chaleur du local et la redistribuer dans un espace à chauffer se fait alors d'une manière plus durable. C'est le rôle des thermofrigopompes des gares de la SGP. Schématiquement, la gare récupère ainsi 900 MWh de chaud l'hiver (équivalent à sa production d'énergie froide). Elle peut consommer le tiers de cette énergie et il ne reste plus que



600 MWh chaud que la gare n'utilisera pas, contre 1200 MWh dans le cas d'une technologie plus classique (figure 8).

Que faire de cette énergie résiduelle ? Cette énergie restante pourra être valorisée dans les bâtiments avoisinants (logements, bureaux, commerces, équipements publics ou privés).

C'est ainsi que la gare devient un producteur d'énergie pour son quartier. Un cercle vertueux se construit sur la mutualisation énergétique. Les équipes techniques et les juristes définissent un cadre contractuel adapté pour redistribuer de la chaleur vers ces bâtiments connexes. SGP étudie en parallèle l'élargissement de son statut

8- Schéma présentant un exemple de mutualisation énergétique entre la gare et les projets urbains. Le surplus d'énergie peut être valorisé.

9- Un cercle vertueux : la gare devient un « hub énergétique » pour le quartier.

10- Intégration de la gare de Créteil l'Échat dans son environnement urbain futur, faisant figurer sur la droite les projets en cours de développement par la SGP.

11- Parvis de la future gare de Créteil l'Échat de la ligne 15.

8- Diagram showing an example of energy resource pooling between the station and urban projects. The surplus energy can be exploited.

9- A virtuous circle: the station becomes an "energy hub" for the district.

10- Integration of Créteil-l'Échat Station into its future urban environment, showing on the right the projects currently being developed by SGP.

11- Square of the future Créteil-l'Échat Station on Line 15.



© AGENCE NICOLAS MICHELIN & ASSOCIÉS - SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS



© AGENCE NICOLAS MICHELIN & ASSOCIÉS - SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS

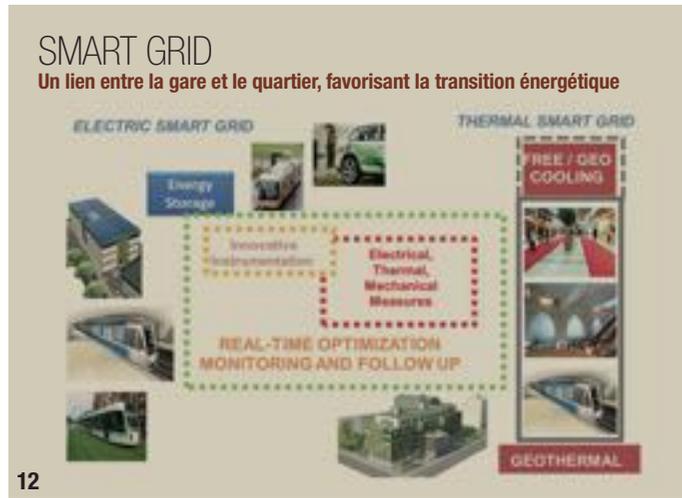
pour devenir un producteur d'énergie à part entière.

Elle devient ainsi acteur de la transition énergétique du territoire (figure 9). Ces discussions sont, par exemple, en cours à Créteil, avec Nexity, promoteur pour le compte de la SGP. Si elles aboutissent, le résidu énergétique issu du froid produit pour le réseau de transport sera valorisé.

Il fournira l'eau chaude sanitaire des résidences étudiantes qui surplomberont la gare de Créteil-l'Échat située entre le CHU Henri Mondor et l'université de Créteil, également partenaires de la SGP sur de nombreux autres aspects du projet.

L'énergie produite pour le GPE est ainsi rentabilisée au maximum, d'un point de vue économique et environnemental. Si, comme à Créteil, le site et les méthodes constructives le permettent, la SGP investit dans des systèmes de géothermie qui dépassent largement ses besoins propres.

La gare sort alors de son rôle d'infrastructure de transport et devient un cœur énergétique, non plus du métro, mais du petit quartier qui se dévelop-



12- Smart grid : un lien entre la gare et le quartier, favorisant la transition énergétique.

12- Smart grid: a link between the station and the district, contributing to the energy transition.

pera avec elle et qu'elle alimentera partiellement, en chaud comme en froid selon les saisons (figures 10 et 11). Ce même raisonnement est également fait pour l'énergie électrique.

Les trains en consomment pour circuler, mais une partie peut être récupérée lors du freinage et réutilisée sur les trains suivants. Bien d'autres cercles vertueux restent à construire, avec les

acteurs locaux, pour avancer ensemble sur un chemin durable et favoriser la transition énergétique à l'échelle du quartier, développer l'intermodalité et favoriser les modes doux de déplacement pour le rabattement vers les gares (figure 5).

Et là aussi la SGP innove, car elle souhaite, grâce au numérique, pousser cette optimisation énergétique, via le pilotage intelligent et les plateformes numériques, vers des *smart grids* au bénéfice des usagers et des collectivités (figure 12).

La multitude de compétences, l'ouverture d'esprit et la volonté de travailler ensemble nous permet de dépasser le cadre standard de la conception technique. Il serait donc réducteur de dire que notre projet est l'un des plus beaux projets de transports au monde. C'est aussi un projet énergétique, environnemental et numérique. Nous initiions surtout - du moins l'espérons-nous - l'élan de cette première moitié du XXI^e siècle qui de nouveau fluidifiera, rationalisera et embellira, en somme dessinera, le Paris des générations à venir. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- NOMBRE DE KILOMÈTRES DE LIGNES : 200**
- NOMBRE DE DÉPARTEMENTS TRAVERSÉS : 5**
- NOMBRE DE GARES : 68**
- NOMBRE DE SITES DE MAINTENANCE : 4**
- DÉMARRAGE DES PREMIERS TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL : Été 2016**
- PREMIÈRE MISE EN SERVICE : 2022**
- ÉCHÉANCE GLOBALE : 2030**
- VITESSE MAXIMALE DES TRAINS : 120 km/h**
- VITESSE COMMERCIALE : 65 km/h**
- ESPACEMENT ENTRE DEUX TRAINS : 2 min**
- TEMPS DE PARCOURS DE LA LIGNE 15 : 80 min**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

(Lignes 15, 16 et 17 et hors lignes 11, 14 Nord, 14 Sud et 18)

- MAÎTRISE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris**
- ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE GÉNÉRALE (DONT AMO INFRA L15, L16 ET L17) : Groupement ARTEMIS (Artelia, Arcadis, Bg)**
- ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE DES SYSTÈMES : Systra**
- MANDATAIRES DES PRINCIPAUX GROUPEMENTS DE MAÎTRISE D'ŒUVRE INFRA OU SITES DE MAINTENANCE : Setec, Ingerop, Systra, Egis**
- MAÎTRISE D'ŒUVRE DES SYSTÈMES : Egis**
- MAÎTRISE MATÉRIEL ROULANT ET AUTOMATISME DE CONTRÔLE : Systra**
- PARTENARIAT INNOVATION : Efficacy**

ABSTRACT

GRAND PARIS: THE ENERGY OF A REGION

OLIVIER DE CHÂLUS, ARCADIS - CRISTINA VALEAN, SGP-EFFICACY

The current period in the Ile-de-France region is one of redefinition and overall reorganisation in every way similar to the Haussmann era (19th century). The 'Grand Paris Express' project, for the contracting authority Société du Grand Paris, is the largest project of this period. It brings together an extraordinary number of players and skills which are constantly increasing and whose concerns, on the eve of starting the civil engineering works, are all the more divergent in that the project deadlines are extremely tight. Despite this, energy synergies are developing around the railway stations, on the scale of their districts. □

GRAN PARÍS: LA ENERGÍA DE UN TERRITORIO

OLIVIER DE CHÂLUS, ARCADIS - CRISTINA VALEAN, SGP-EFFICACY

El período que vive actualmente la región de París, en todos los aspectos comparable a la era haussmanniana, es un período de redefinición y reorganización global. El Grand Paris Express, impulsado por la entidad pública francesa Société du Grand Paris, es el proyecto más importante de este período. Concentra un número inédito de actores y competencias que no dejan de aumentar, y cuyas preocupaciones, a las puertas del inicio de las obras de ingeniería civil, son tan amplias como extremadamente estrictos son los plazos del proyecto. Pese a ello, se están desarrollando sinergias energéticas en torno a las estaciones a escala de sus barrios. □



1

© JUAN ROBERT

CONSTRUCTION DE LA PETITE CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE ET DE LA PASSE À POISSONS DU POUZIN

AUTEURS : FABIEN PELLET, RESPONSABLE DU LOT GC, CNR INGÉNIERIE - BERTRAND CHALLUS, CHEF DE PROJET, CNR INGÉNIERIE

CNR, CONCESSIONNAIRE DU FLEUVE RHÔNE ENTRE LA FRONTIÈRE SUISSE ET LA MER MÉDITERRANÉE, A LANCÉ UN PROGRAMME DE CONSTRUCTION DE PLUSIEURS PETITES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES, DONT FAIT PARTIE CELLE DU POUZIN QUI TURBINE 64,5 M³/S SOUS 11 M DE CHUTE, AVEC UNE PASSE À POISSONS QUI LAISSE TRANSITER 1,5 M³/S. LES TRAVAUX COMPRENNENT UN BLOC USINE, UN CANAL D'AMENÉE, UN CANAL DE REJET ET UNE SUCCESSION DE 49 BASSINS, UN CANAL DE TRANSFERT POUR LA PASSE À POISSONS AINSI QU'UN CANAL DE DÉVALAISON.

INTRODUCTION

Le cahier des charges de la Compagnie Nationale du Rhône et son schéma directeur associé prévoient que le concessionnaire contribue au développement des énergies renouvelables par la réalisation, lorsque c'est économiquement rentable, de petites centrales hydroélectriques (PCH) pour valoriser la restitution des débits réservés. En accord avec l'Agence de l'Eau, il a également été décidé de construire une passe à poissons (PAP) et un dispositif de grilles

finies associées à un exutoire de dévalaison, afin d'empêcher le passage des poissons dans la turbine de la PCH. L'ouvrage principal est constitué par un bloc usine semi-enterré de 80 m de long, 10 m de large et 22 m de hauteur. Cette boîte de béton, qui accueille les principaux équipements électromécaniques, est complétée par :

→ Un canal d'amenée de près de 100 m de longueur, 6,80 m de soutènement utile et largeur variant de 16 m à 12 m à l'amont de l'usine ;

1- Vue aérienne du projet en cours de réalisation, avant terrassement des bouchons amont et aval.

1- Aerial view of the project under construction, before earthworks for the upstream and downstream plugs.

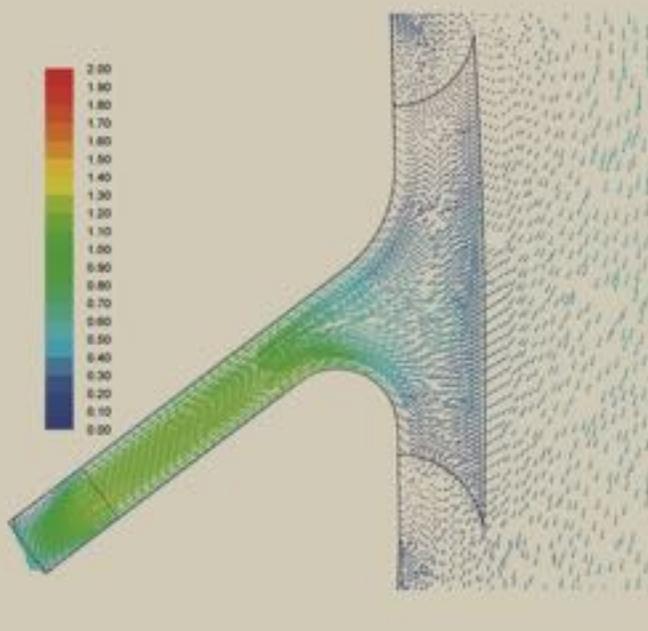
→ Un ouvrage de liaison, équipé des grilles fines et d'un dégrilleur ;
→ Un canal de rejet d'une longueur totale d'environ 80 m, remontant selon une pente variable jusqu'au Rhône en aval du barrage.

La passe à poissons (PAP) est constituée principalement par :

→ Une succession de 49 bassins de largeur pour permettre la montaison des poissons ;
→ Un canal de transfert sur la partie amont jusqu'à la retenue du barrage.

COURANTOLOGIE

Exemple de répartition de vitesses à la surface libre sur modèle mathématique



2- Courantologie - exemple de répartition de vitesses à la surface libre sur modèle mathématique.

3- Plans des mesures de vitesses normales sur une élévation du conduit hydraulique.

4- Exemple de répartition de vitesses sur un profil pour un débit total aménagement de 1390 m³/s.

2- Example of velocity distribution on the free surface on a mathematical model.

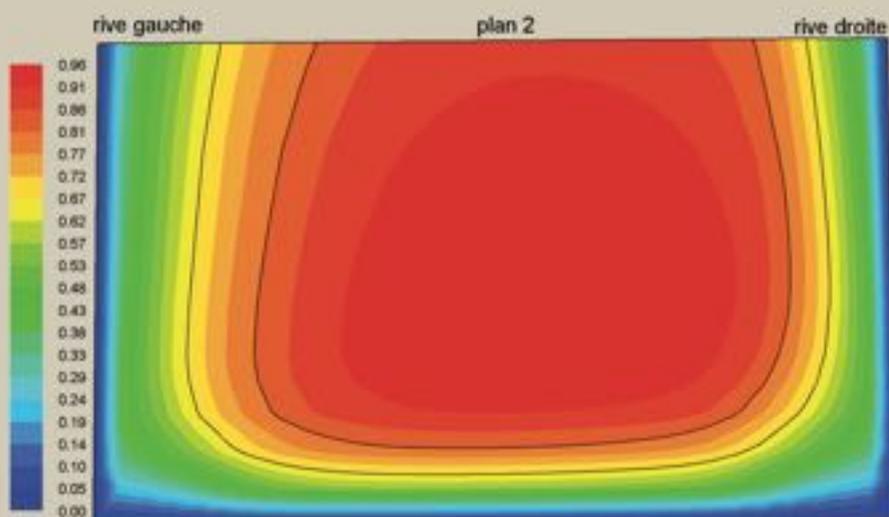
3- Maps of normal velocity measurements on an elevation view of the water conduit.

4- Example of velocity distribution on a profile for a total project delivery of 1,390 m³/s.

PLANS DES MESURES DE VITESSES NORMALES SUR UNE ÉLÉVATION DU CONDUIT HYDRAULIQUE



EXEMPLE DE RÉPARTITION DE VITESSES sur un profil pour un débit total aménagement de 1390 m³/s



L'ensemble de ces ouvrages (figure 1), réalisés sous maîtrise d'œuvre CNR Ingénierie, a été confié suivant 3 lots aux groupements :

- Eiffage TP / Forézienne d'Entreprises / Bauland TP pour les travaux de génie civil ;
- Voith / Jeumont pour les travaux électromécaniques ;
- Kunz pour les grilles fines et le dégrilleur.

Les travaux du lot génie-civil ont fait appel à plusieurs disciplines : des palplanches et rideaux d'ancrage ; des terrassements, du déroctage, de la démolition, du génie civil, du VRD ; des travaux spéciaux tels que paroi au coulis, paroi moulée, clous.

CHOIX DE CONCEPTION

La conception des différents ouvrages a d'abord été guidée par les calculs hydrauliques.

Pour la prise d'eau de la PCH, les pertes de charges et la répartition des vitesses constituent le principal enjeu, avec la problématique des embâcles. Des simulations sur modèle mathématique 3D (figures 2, 3 et 4) ont ainsi été couplées à un modèle physique (figure 5) afin d'optimiser l'orientation et la géométrie du canal d'amenée. Les différentes modélisations du canal d'amenée réalisées ont conduit aux conclusions suivantes :

- La solution canal taluté a été écartée car des recirculations étaient générées ;
- La conception initiale avec un soutènement droit et un fond en enrochements permet d'atteindre les objectifs fixés en terme de répartition spatiale des vitesses pour différentes conditions de débit ;
- Les écoulements sont améliorés par un entonnement doux de 16 m de largeur à 12 m de largeur ;
- La présence de la grille fine à l'entrée d'eau permet d'homogénéiser les écoulements.

Pour le type de soutènement, outre l'impératif économique, le choix s'est porté vers une solution palplanches avec rideau principal ancré par un rideau passif arrière, pour différentes raisons :

- Réaliser un maximum de travaux à sec depuis la plateforme, notamment au niveau de la prise d'eau à la connexion avec le canal usinier ;
- Limiter les terrassements et éviter de travailler dans la nappe qui est au-dessus du fond du canal ;
- Éviter les butons pour faciliter les terrassements et la gestion ultérieure des embâcles ;

→ Opérations de battage possibles dans les terrains en place (pied du rideau principal au-dessus du substratum).

L'enfoncement du bloc-usine est affiné par le turbinier pour assurer le fonctionnement correct de la machine. Les emprises et le contexte hydrogéologique le permettant, il a été décidé, dès l'avant-projet, de réaliser le bloc usine en fouille ouverte. Les travaux étant à réaliser sous le niveau du Rhône aval barrage et sous la nappe, la fouille a été protégée par un écran étanche au large, ancré dans le substratum rocheux. Globalement, cette solution reste plus intéressante économiquement que la paroi moulée et elle permet surtout de mieux maîtriser les travaux à l'avancement, en particulier pour l'intégration des planchers et tuyauteries dans les voiles.

Le conduit hydraulique (figure 6) est équipé d'un batardeau amont mis en place par le dégrilleur, d'une vanne aval qui fonctionne en coupure et d'un batardeau aval pour lequel une grue mobile est nécessaire.

L'accès à l'usine est prévu depuis la plateforme rive gauche de l'ouvrage, au-dessus de la crue millénaire.

Un escalier permet d'accéder à la salle des machines et de desservir les locaux électriques aux niveaux intermédiaires. La salle des machines est située sur un seul niveau à (80,80), elle a une superficie de 8,80 m x 27,15 m et une hauteur sous plafond de 7,70 m. Elle accueille tous les équipements auxiliaires du groupe. Les maintenances courantes sont assurées par un pont roulant de 32 t circulant sur des consoles en béton.

La route départementale D248 est rétablie sur le toit de la salle des machines dans sa configuration finale.

La géométrie du canal de rejet permet de limiter les pertes de charges sur le raccordement au Rhône en aval du barrage. Sa longueur est notamment définie par les emprises nécessaires à la fouille ouverte et au batardeau de protection provisoire vis-à-vis du Rhône. La remontée du fond est assez rapide jusqu'au toit du rocher, puis en pente douce jusqu'au lit naturel du fleuve. Dans ce canal aussi les butons ont été proscrits pour des raisons de sécurité et de maintenance ultérieure (chocs d'embâcles notamment).

La problématique de franchissement piscicole a été traitée à la fois pour la montaison et la dévalaison.

Pour la montaison, les choix ont été guidés par une concertation élargie avec



5

l'Onema, allant du tracé global de l'ouvrage jusqu'aux détails du fond de la passe, pour créer la rugosité adéquate. Les caractéristiques des bassins ont, de leur côté, été adaptées aux capacités des espèces cibles, suivant des calculs de dissipation d'énergie classiques. Ainsi, les caractéristiques qui ont été finalement retenues sont les suivantes :

- Le canal sur la partie amont est de largeur 3,20 m et de longueur 125 m environ ;
- Les bassins sont de largeur 3,50 m et de longueur 4,50 m ;
- Ils sont séparés par une cloison en U à double fente (30 cm et 40 cm) ;
- Le fond des bassins est tapissé de gros galets (15 à 20 cm de grand axe) et équipé de plots préfabriqués tronconiques espacés de 60 cm.

Il est à noter qu'un système amovible de comptage par vidéo des poissons,

5- Courantologie - modélisation physique des écoulements au droit du canal d'amenée.

6- Phase conception-vue 3D du génie civil du bloc-usine et du conduit hydraulique.

5- Physical modelling of flows in the headrace channel.

6- Design phase - 3D view of civil works for the powerplant unit and the water conduit.

innovant sur le Rhône (1^{er} système suivi sur la PCH de Rochemaure en 2015), va compléter ce dispositif en remplacement des traditionnelles nasses de piégeage.

Pour la dévalaison, avant d'arriver au choix final, des études sur des dispositifs de répulsion par infra-sons ont été menées. Ceux-ci ayant été non concluants, la maîtrise d'œuvre a ensuite étudié un dispositif de grilles fines (entrefer de 2 cm) empêchant les poissons d'être entraînés vers la roue, avec un guidage des poissons dans une goulotte de dévalaison.

La problématique des embâcles a été prise en compte avec le choix d'une récupération des déchets via un dispositif de dégrillage, fonctionnant manuellement ou en automatique.

CONTEXTE ET ENJEUX

GÉOLOGIE

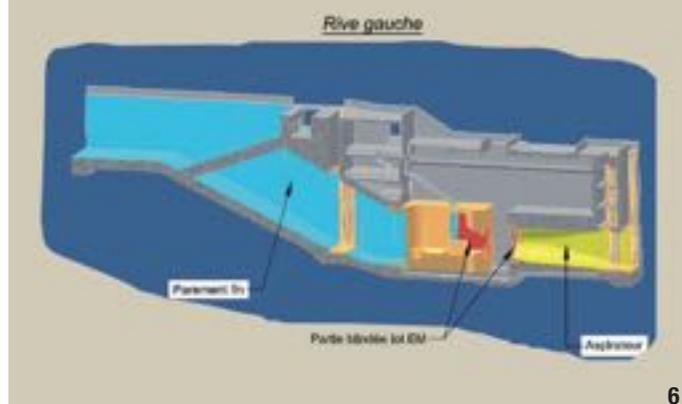
Le substratum des alluvions du Rhône au droit du site est constitué de terrains sédimentaires du Jurassique Supérieur et du Crétacé Inférieur.

Ces terrains affleurent largement en rive droite. En rive gauche, ils sont recouverts par des alluvions anciennes. Les principales failles indiquées sont des failles NNE-SSW qui soulignent l'effondrement des terrains secondaires sous le Rhône et des failles ENE-WSW recoupant les précédentes.

Le sous-sol du site est constitué d'un substratum calcaire (alternance de calcaires et de marnes de l'Hauterivien) recouverts par des alluvions fluviales et par deux à trois mètres de limons. Ces derniers ont été, en grande partie, décapés lors des travaux d'aména-

PHASE CONCEPTION

Vue 3D du génie civil du bloc-usine et du conduit hydraulique



6
© DR



7

© JUAN ROBERT

gement du barrage en 1960-61 pour constituer le corps des digues mixtes du canal d'aménée.

Le toit du substratum rocheux présente une très légère pente vers l'est (vers le barrage) entre les cotes +78 m NGF au droit du projet et +77.5 m NGF sous le barrage.

LES PRINCIPAUX RÉSULTATS GÉOTECHNIQUES

Les études ont été menées suivant la norme NF P 94.500 en suivant l'enchaînement des missions depuis la G1 jusqu'à la G4. En parallèle, une analyse spécifique des risques géotechniques

7- Paroi au coulis en cours d'excavation - vue aérienne.

8- Fouille en cours d'excavation - vue d'amont.

7- Grout wall undergoing excavation - aerial view.

8- Excavation in progress - upstream view.

encourus a été menée de manière à les anticiper et à les limiter en phase chantier.

Un programme d'investigations a été mené afin de cibler au mieux le mode opératoire des différents ouvrages à réaliser et plus particulièrement le bloc-usine.

Ces investigations ont permis de mettre en lumière, notamment, une perméabilité du substratum de l'ordre de 5.10^{-6} à 2.10^{-7} m/s, valeurs qui permettent de valider la solution d'une fouille ouverte avec écran d'étanchéité.

Des essais dilatométriques ont également été menés au cœur du subs-

stratum. Les valeurs suivantes ont été retenues :

→ Module d'Young : $E = 12$ GPa env.

→ Module de déformation :

$G = 4,9$ GPa env.

Concernant les graves sableuses surmontant ce substratum, celles-ci renferment de nombreux galets et blocs de taille supérieure à 200 mm, principalement dans les trois premiers mètres de terrain et plus ponctuellement en profondeur.

Les caractéristiques pressiométriques des terrains sablo-graveleux sont les suivantes :

→ PI de 0,8 MPa à > 5 MPa,

→ PI moyenne = 2,8 MPa,

→ EM moyen égal à 28 MPa

(de 6,3 à 91,5 MPa).

Afin de confirmer la faisabilité du canal d'aménée en palplanches, un essai de battage a été mené, en phase d'études, afin de prédéfinir l'inertie la plus adaptée au contexte géotechnique.

LES ENJEUX HYDRAULIQUES

La protection du chantier vis-à-vis du risque hydraulique constitue également un des enjeux importants de ce type de chantier, du fait de la configuration du site. Le niveau de protection a ainsi été fixé pour les différentes phases de réalisation des ouvrages, avec l'impératif de ne pas noyer l'ouvrage pour un niveau de crue de fréquence centennale pour les premières phases de terrassement et de génie civil.

Les principales opérations de montage électromécanique ont été menées à l'abri de de batardeaux métalliques, portant la protection à un niveau de crue millénaire.



8

© JUAN ROBERT



9

© DR

Après la mise en œuvre de ces éléments, les bouchons amont et aval ont été terrassés avec des moyens terrestres traditionnels, selon une procédure assurant la sécurité vis-à-vis du risque hydraulique sur la période de réalisation.

LA FOUILLE DU BLOC-USINE

La fouille ouverte pour réaliser le génie civil a été étanchée par une paroi au coulis ancrée dans le substratum. Pour limiter le rejet d'eau chargée, des bacs de décantation ont été réalisés, avant rejet au Rhône.

Le phasage qui a été suivi, avant montage de la grue à tour, est le suivant :

- Préparation de la plateforme générale et de la plateforme aval barrage rive droite ;
- Préterrassement à la cote maximale de (87,5) ;
- Réalisation de la paroi au coulis jusqu'à la cote maximale de (76.5) ;
- Terrassements des matériaux meubles de la fouille jusqu'à la cote (78), et rabattement ;
- Terrassements dans le rocher jusqu'à la cote minimale de (70,15).

La paroi d'étanchéité, mise en œuvre à la benne hydraulique guidée par un kelly, a été réalisée dans la continuité des murettes-guides. Elle se décompose en panneaux primaires ou secondaires de 2,50 m et de 1,80 m de longueur. Chaque panneau est excavé par passes de 2,50 m ou de 1,80 m. Le recouvrement a été effectué sur une largeur

minimale de 25 cm. Enfin, un plot d'essai a permis de valider le mode opératoire pour l'ancrage dans le substratum, qui a pu être réalisé avec un second atelier équipé d'un trépan. Les déblais ont été déposés dans des bassins provisoires situés au centre de la fouille (figure 7).

Les terrassements de grande masse ont été effectués avec des moyens classiques : pelle hydraulique à guidage 3D, bouteurs et dumpers. Les déblais rocheux (figure 8) ont été fragmentés par une pelle équipée d'un brise-roche hydraulique BRV55. L'épuisement de

9- Bétonnage du radier incliné à la pompe et coffrage glissant.

10 et 11- Bétonnage du U accueillant l'alternateur.

9- Concreting the sloping invert by pump and sliding formwork.

10 et 11- Concreting the U-section receiving the generator.

la fouille a été assuré par des pompes de 180 m³/h installées dans deux puits crépinés et refoulant dans les bassins de décantation.

Les talus de la fouille ont fait l'objet de purges locales, d'un drainage par barbacanes et d'un confortement généralisé par clous (type GEWI 32 scellés au mortier type 705 Clavex+) afin de garantir leur stabilité vis-à-vis du risque de glissement.

Un grillage double-torsion a également été posé sur le front rocheux de manière à se prémunir des chutes de blocs instables.



10

© DR



11

© DR

DESCRIPTION DES MODES OPÉRATOIRES (RADIÉ, VOILES, ETC.)

Les bétons utilisés sont des BPE C30/37 D22 S3. La centrale principale est basée à Loriol (7 km) et une centrale de secours à Montélimar (26 km). Les épreuves de convenance en début de chantier ont permis de s'assurer de la conservation de la rhéologie du béton pendant 2 heures, le chantier autorisant une durée maximale d'1h30 entre la fabrication et la mise en œuvre dans les coffrages.

Les radiers horizontaux sont réalisés de manière classique avec un béton C30/37 (XF1, XC2). Le bloc usine est constitué d'un seul plot. Aux jonctions avec le plot de liaison en amont de la grille fine (figure 12) et avec le canal de rejet à l'aval, l'étanchéité est assurée par la mise en place d'une bande d'arrêt d'eau interne joint esobande couchouc WD225 (Esope Continental). Les surfaces de reprise sont ratisées à l'exception d'une bande localisée sur laquelle est appliquée un joint hydrogonflant Lankocast Mastic 266 (Parex Lanko) ou cordon Lankocast 264 SW20 (Parex Lanko) en périphérie.

Le radier incliné est réalisé à l'aide de coffrages glissants (figure 9). Afin de retenir le béton (consistance S1/S2), des bandes de Nerlat sont déployées dans la partie supérieure du ferrailage. Les coffrages glissants évoluent sur deux règles en acier, supportées par des profilés équipés de plaques de répartition. Les outils de bétonnage sont tractés par des treuils fixés au radier en partie haute du plot de liaison. Des poulies permettent de désaxer les outils de part et d'autres des attentes du voile divisoir. Les coffrages glissant sont lestés pour équilibrer la poussée du béton. Le bétonnage s'est déroulé en une journée, sur 20 heures environ.



12- Grille fine de l'entrée d'eau.

12- Fine-mesh grid on the water inlet.

La méthode permet donc un gain de temps certain par rapport à des passes de béton coffré. On doit noter que la maîtrise des outils et l'expérience des équipes sont deux critères importants pour maîtriser la prise du béton et éviter le fluage du béton frais au fur et à

mesure de la remontée des outils de bétonnage. Les voiles du bloc usine sont coffrés avec des éléments modulaires et bétonnés en C30/37 (XF3, XC4). Les reprises sont traitées par hydrogonflant, les trous de tiges par des entretoises et embouts étanche 26x30 et bouchon Decki Étanche (Technique Béton). Après l'arrêt des épaissements en fond de fouille, des venues d'eau sont constatées principalement au niveau des trous de tiges. Les bouchons concernés sont généralement remplacés par des bouchons hydrogonflants (Technique Béton) et les

fuites ont été étanchées. Une attention particulière est portée à l'étanchéité du puits (voile en U) dans lequel seront installés l'alternateur et le multiplicateur (figures 10 et 11).

Le dispositif est composé de bouchons hydrogonflants (Technique Béton), remplissage au mortier de ragréage Lankorep 731 (Parex Lanko) et mortier d'imperméabilisation Coral (Technique Béton) pour les trous de tige, de mortier d'imperméabilisation pour les reprises de bétonnage verticales et horizontales. Le voile courbe du puits est d'ailleurs bétonné en une fois pour limiter les reprises. Dans l'entrée d'eau (figure 12), des dalles inclinées sont pour partie au-dessus du radier incliné. Le principe constructif retenu est d'installer un ensemble de tours d'étalement sur des longrines provisoires implantées sur le radier. Le bétonnage de la dalle est effectué en deux phases pour limiter les charges sur les tours d'étalement. À fin juin 2016, l'ouvrage génie civil est terminé, le montage électromécanique est en bonne voie. Les canaux d'amenée et de rejet sont connectés au canal usinier à l'amont et au Rhône à l'aval. Le bloc usine est soumis à la nappe. Le conduit hydraulique sera mis en eau prochainement. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI AU COULIS : 4 000 m²
DÉBLAIS GÉNÉRAUX : 140 000 m³
REMBLAIS : 95 000 m³
BÉTON (PCH+PAP) : 9 200 m³
ARMATURES : 1 000 t
PALPLANCHES/TIRANTS : 430 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Compagnie Nationale du Rhône - Direction du Patrimoine Fluvial et Industriel
MAÎTRE D'ŒUVRE ET ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE : Compagnie Nationale du Rhône - Direction de l'Ingénierie
ENTREPRISES :
 Eiffage TP (mandataire) / Forézienne / Bauland TP,
 Voith Hydro Italie (mandataire) / Jeumont,
 Künz (Autriche)

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF THE SMALL HYDROPOWER STATION AND FISHWAY AT LE POUZIN

FABIEN PELLET, CNR INGÉNIERIE - BERTRAND CHALUS, CNR INGÉNIERIE

CNR (Compagnie Nationale du Rhône), concession operator on the Rhone River between the Swiss border and the Mediterranean Sea, has started a programme of construction of several small hydropower stations, including one at Le Pouzin whose turbines deliver 64.5 m³/s with a head of 11 metres, and with a fishway through which water flows at 1.5 m³/s. The works comprise a power-plant unit, a headrace channel, a discharge channel and a series of 49 reservoirs, a transfer channel for the fishway, and a downriver run channel. The civil engineering works were completed in 24 months in an open-cut excavation sealed by a grout wall anchored in the substrate allowing the structures to be executed on dry land. □

CONSTRUCCIÓN DE LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA Y DEL PASO PISCÍCOLA DE POUZIN

FABIEN PELLET, CNR INGÉNIERIE - BERTRAND CHALUS, CNR INGÉNIERIE

La compañía energética francesa CNR (Compagnie Nationale du Rhône), concesionaria del río Ródano entre la frontera suiza y el Mediterráneo, ha lanzado un programa de construcción de varias pequeñas centrales hidroeléctricas, entre ellas la de Pouzin, que turbin 64,5 m³/s bajo 11 m de cascada, con un paso piscícola de 1,5 m³/s de caudal. Las obras incluyen un bloque mecanizado, un canal de conducción, un canal de desagüe y una sucesión de 49 estanques, un canal de transferencia para el paso piscícola y un canal aguas abajo. Las obras de ingeniería civil se han ejecutado en 24 meses en una fosa excavada abierta, impermeabilizada mediante una pantalla de lechada anclada al sustrato que permite realizar las obras en seco. □



RTE ET SES CHANTIERS DE LIAISONS SOUTERRAINES

AUTEURS : SERGE HASCOËT ET FRÉDÉRIC LESUR, INGÉNIEURS EXPERTS À RTE

RTE, GESTIONNAIRE DU RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ EN FRANCE, DÉVELOPPE ACTUELLEMENT SES INFRASTRUCTURES À HAUTEUR DE 1,5 MILLIARD D'EUROS PAR AN. L'OPTIMISATION TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE DES MODES DE POSE A PERMIS UNE FORTE AUGMENTATION DU DÉPLOIEMENT DE LIAISONS SOUTERRAINES DE PLUS DE VINGT KILOMÈTRES NÉCESSAIRE AU RENFORCEMENT ET AU DÉVELOPPEMENT DU RÉSEAU.

RTE exploite, maintient et développe le réseau Français d'électricité à haute et très haute tension (HTB). Garant de son bon fonctionnement et de la sûreté du système électrique, RTE achemine l'électricité entre les producteurs (français et européens) et les consommateurs que sont les distributeurs d'électricité (Enedis et 25 régies locales de distribution) ou industriels (plus de 500) directement raccordés au réseau de transport.

Avec 105000 km de liaisons de tension comprise entre 63 kV (HTB1) et 400 kV (HTB3) (figure 1), et 50 connexions transfrontalières, le réseau géré par RTE est le plus important d'Europe. Malgré un contexte marqué par un environnement économique difficile, RTE projette de moderniser et de développer son réseau en investissant 1,5 milliard d'euros par an sur la période 2015-2024. Pour ce faire, RTE reste responsable du pilotage global de ses chantiers, qu'ils soient en

phase études ou bien en phase travaux. Des entreprises, sélectionnées au moyen de systèmes de qualification publiés au Journal Officiel de l'Union Européenne, réalisent pour partie les études, la fourniture et les travaux des liaisons souterraines HTB. Les groupes

affiliés à la Fntp et plus particulièrement au Serce sont présents sur ce marché mais aussi de grosses PME.

ÉMERGENCE DES TECHNIQUES SOUTERRAINES

L'acceptabilité du public est un facteur déterminant dans le déroulement d'un projet de renouvellement ou de développement de réseau. Le processus de concertation avec les élus et les riverains puis la délivrance des autorisations administratives requièrent souvent trois ans, parfois plus de dix. L'absence d'impact visuel d'une liaison souterraine (LS) et la réduction des coûts, notamment par des opérations de mécanisation (figure 2), ont contribué à l'essor de la construction en souterrain des ouvrages neufs. En moyenne, 97 % des liaisons de RTE pour les niveaux de tension 63 et 90 kV ont été réalisées ces trois dernières années en souterrain (source : Bilan électrique français 2015).

GÉNÉRALISATION DE LA POSE EN FOURREAUX

Depuis une vingtaine d'années, le mode de pose le plus courant consiste à installer des fourreaux (tubes en matière plastique) au fond d'une tranchée, de remblayer cette dernière, puis de tirer les câbles dans les fourreaux au moyen d'une câblette d'acier et d'un treuil. Du fait de la fourniture supplémentaire de matériel (fourreaux en barres soudables ou à manchons, ou fourreaux enroulables livrés sur touret), le recours à des fourreaux est potentiellement plus onéreux. Mais il comporte de nombreux avantages. Il est possible de dissocier les opérations de génie civil de celles de tirage câbles (anticipation dans le cas de travaux mutualisés, investissements séparés, gestion du cas des câbles non disponibles suite à des aléas de fabrication). Il n'est pas nécessaire d'ouvrir la tranchée sur toute la longueur de déroulage (qui peut atteindre plus de 2000 m pour les câbles de plus forte section). ▷

- 1- Déroulage d'un câble HVDC de grande longueur.
- 2- Pose mécanisée LS HTB1.
- 3- Double LS en urbain.

- 1- Unwinding a very long HVDC cable.
- 2- Mechanised laying of HVB1 underground link.
- 3- Double underground link in urban area.



© CNER

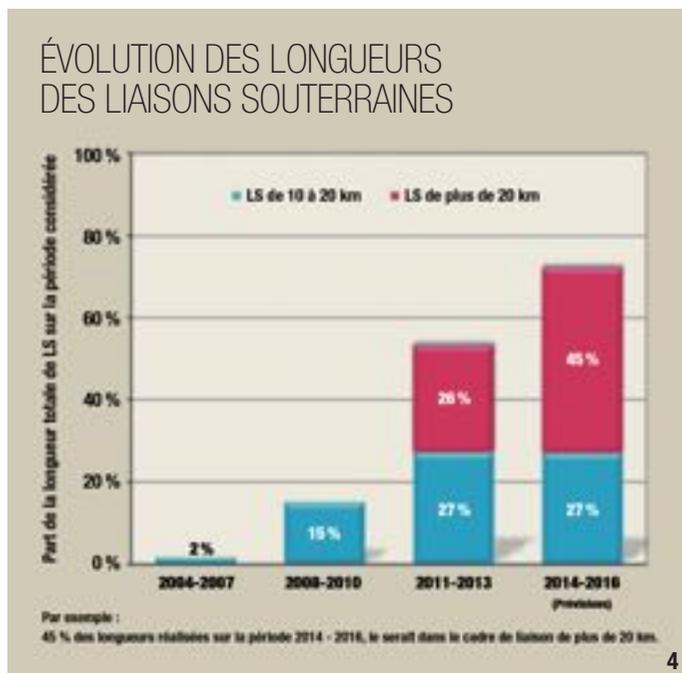
2

3

Le chantier peut alors progresser par translation avec une fenêtre d'ouverture relativement étroite, ce qui limite le risque de nuisances aux riverains. Couplées au passage d'un gabarit de contrôle, des techniques d'inspection par caméra permettent de s'assurer du bon état des fourreaux avant le tirage des câbles. En fin de vie de la liaison, il suffit de retirer les vieux câbles afin de les remplacer par des câbles plus performants (si le diamètre le permet), sans avoir à recommencer les travaux de génie civil (reprise du projet dans sa totalité qui supposerait la délivrance de nouvelles autorisations administratives). Deux types de fourreaux sont utilisés. En milieu urbain, des fourreaux PVC d'environ 4 mm d'épaisseur sont disposés en fond de tranchée à l'aide de « peignes espaceurs » (figure 3) qui garantissent une géométrie régulière des circuits (position des tubes en trèfle ou en nappe horizontale), puis enrobés de béton sur une dizaine de centimètres autour du gabarit externe (figures 3 & 6).

Cette protection mécanique s'avère indispensable aux endroits où RTE partage le sol avec d'autres opérateurs de réseaux souterrains. Malgré les progrès des systèmes géographiques d'information (SIG), les Déclarations d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) et le grillage avertisseur rouge placé au-dessus des ouvrages électriques, près de 60% des avaries des câbles de transport sont dues à des agressions mécaniques par un tiers. En milieu rural, la pose de fourreaux en polyéthylène haute densité (PEHD) bénéficie des avantages de la mécanisation lorsqu'une trancheuse peut progresser sans croiser d'autres ouvrages souterrains. Les trois tubes qui recevront les câbles électriques sont sanglés en trèfle jointif avec un fourreau plus petit destiné aux fibres optiques qui assurent la communication entre les postes électriques (contrôle-commande, protections). Puisque l'ensemble compact des fourreaux peut être déposé sans intervention humaine en fond de tranchée sitôt celle-ci creusée, une technique de tranchée étroite convient avec des gains économiques et de durée d'exécution déterminants (figure 5). En outre, l'absence de nécessité de boisage vertical pour éviter les éboulements simplifie grandement les opérations. Le remblayage qui suit le passage des machines permet de limiter l'ouverture de la tranchée au strict nécessaire et réduit les perturbations des voies de circulation.

ÉVOLUTION DES LONGUEURS DES LIAISONS SOUTERRAINES



4
© CNER

LE RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE LS DE RTE

L'arrêté du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique (dit « Arrêté Technique de 2001 ») veille à ce que les installations et leurs travaux soient conformes aux règles de l'art et à toutes les mesures de sécurité.

Conformément aux exigences de ce document réglementaire, le Centre National d'Expertise Réseaux (Cner) de

4- Évolution des longueurs des liaisons souterraines.

5- Pose mécanisée de PEHD en milieu rural.

4- Evolution of underground link lengths.

5- Mechanised laying of HDPE tubes in a rural area.

RTE a établi et entretient un référentiel technique permettant de réaliser le génie-civil de ces liaisons souterraines en fonction de l'environnement dans lequel sera implantée la future liaison. Par exemple, des essais grandeur nature sont réalisés en laboratoire.

De vrais courts-circuits sont appliqués à une gamme de configurations afin de déterminer celles qui apportent toutes les garanties de sécurité. Même si ces défauts restent très exceptionnels, ils se traduisent par la libération d'une très grande énergie pendant un temps très court (de l'ordre de quelques centaines de millisecondes, nécessaire à la détection et à la coupure du défaut par un disjoncteur).

Aucune manifestation à la surface du sol ne doit compromettre la sécurité des biens et des personnes. À ce titre, les fourreaux, l'éventuel béton d'enrobage et la couche de sol au-dessus des circuits constituent une sorte de « bouclier de protection ».

Les nombreuses campagnes d'essais permettent au Cner de vérifier la capacité de confinement d'un défaut câble pour une solution technique type donnée dans ce référentiel technique. En moyenne, une tranchée de 1,5 m de profondeur est nécessaire pour recevoir l'ouvrage de ces LS.

Une sélection de matériaux performants, mais plus onéreux, permet de réduire notablement cette profondeur en fonction de la destination et du lieu d'implantation.



5
© CNER



6



7

INTÉRÊT DES FOURREAUX PEHD

Aujourd'hui, la part de pose des câbles en fourreaux PEHD est au moins égale à celle en fourreaux PVC enrobés de béton. L'utilisation de caniveaux en béton armé est quant à elle tombée en désuétude.

Le tube de polyéthylène est susceptible de confiner à lui seul le défaut selon l'épaisseur et la qualité de la matière extrudée, tout en offrant une protec-

6- Solution thermique sur tubes PEHD.
7- Trancheuse.

6- Thermal solution on HDPE tubes.
7- Trencher.

tion vis-à-vis des outillages à main (par exemple, un essai normalisé de coup de pioche a été défini). De ce fait, l'enrobage des tubes avec du mortier ou du béton devient superflu.

Grace à la revue n°31 des règles de certification NF 114 proposée par le laboratoire national de métrologie et d'essais, en collaboration avec le Cner, et approuvé le 17 juillet 2015 par l'AFNOR Certification, RTE a pu pres-

crire dans son référentiel technique LS, une fourniture de tube PEHD issue de cette marque. La création du Groupe 5 de la marque NF 114 garantit la qualité de ce mode de pose et en facilite l'approvisionnement par les titulaires des accords cadre relatifs à ces travaux.

DIMENSIONNEMENT THERMIQUE DES CIRCUITS

La capacité de transport d'un câble souterrain (l'intensité du courant qu'il est possible d'y transiter) est directement liée à son comportement thermique : le nombre d'ampères admissibles est limité par la température atteinte par son âme conductrice (le conducteur central du câble, en aluminium ou en cuivre). En effet, tout conducteur métallique parcouru par un courant électrique chauffe : ce sont les pertes par effet Joule. Il s'agit alors de ne pas porter l'isolant plastique à une température qui provoquerait un vieillissement prématuré, voire une dégradation irréversible et très rapide (« claquage » du câble).

Dans le cas des câbles HTB installés actuellement par RTE, l'exploitant veille à ne jamais dépasser la température de 90°C sur l'âme conductrice. L'échauffement d'un câble dépend de la résistance du conducteur (elle-même liée au métal et à la section de l'âme) et de l'intensité du courant : $R.I^2$.

La proximité de sources de chaleur telles que d'autres câbles de transport d'énergie (HTB ou HTA), des conduites de vapeur ou de réseaux de chaleur (comme celles du CPCU), est de nature à limiter le courant circulant dans le câble et par conséquent sa capacité de transport d'énergie. Il est donc essentiel de limiter ces apports thermiques extérieurs et de favoriser la dissipation de ceux produits par la LS HTB.

L'optimisation de la conception électrotechnique de chaque liaison passe, pour chaque chantier, par des études de dimensionnement thermique en effectuant un choix du mode de pose à réaliser en génie-civil, et du mode de mise à terre des écrans des câbles. La nature du sol joue un rôle déterminant dans la capacité de transport d'un câble. Le nombre d'ampères transités sera d'autant plus important que le sol conduit bien la chaleur. L'échauffement du voisinage immédiat du câble peut, lorsque la température est importante, s'accompagner d'un phénomène de migration d'humidité qui augmente la résistance thermique du sol et s'oppose encore davantage à la dissipation des calories générées par le câble. ▷

Ce cycle non vertueux peut conduire à un emballement thermique et à la détérioration du câble. Par conséquent, il est important d'installer un circuit de puissance dans un environnement contrôlé, dont on maîtrise les caractéristiques, et invariant dans le temps. À ce titre, le béton peut, outre sa fonction de protection mécanique, apporter une solution thermique et repousser l'interface critique avec le sol (figure 6).

LES LIAISONS DE GRANDE LONGUEUR

Le nombre de LS HTB de grande longueur (plus de 20 km) est en forte augmentation sur le réseau de RTE, comme le montre le graphe (figure 4), et ce tant en HVDC (High Voltage Direct Current = courant continu haute tension) qu'en alternatif.

L'implantation, relativement récente, des LS en domaine rural contribue, en grande majorité, à cette progression. En effet, la présence faible, voire nulle, d'autres réseaux dans ce domaine est favorable à la mécanisation de la réalisation de l'ouvrage de génie-civil (utilisation d'une trancheuse - figure 7), notamment pour des tracés privilégiant le plein champ. Néanmoins, ces liaisons peuvent représenter une difficulté d'une part, en termes d'acceptation par les riverains (de nature à allonger la durée des procédures administratives) et d'autre part pour la livraison des tourets de grande longueur de câble (figures 8 & 9).

Le raccordement de deux câbles d'une même phase se fait dans une chambre non visitable appelée chambre de jonctions (figure 10). À longueur d'ouvrage équivalent, l'allongement des tronçons de câble (entre deux chambres de jonctions) permet de réduire le coût de la liaison souterraine : moins de livraison et de déchargement des tourets de câbles à l'emplacement des chambres de jonction, moins d'achat et de montage des jonctions.

De plus, cela permet d'augmenter la fiabilité de la liaison car les jonctions restent potentiellement les points faibles des liaisons HTB.

Compte tenu du caractère onéreux des câbles HTB de forte section, RTE a développé une méthode et un outil numérique de calcul des efforts de déroulage exercé sur le câble tant en compression (effort non enregistrable durant le déroulage) qu'en traction (effort enregistrable sur un treuil).

La description des moyens de déroulage envisagés et du tracé, en affectant des coefficients de frottement en



8

© CNER



9

© CNER

fonction des modes de pose rencontrés, permet de localiser les efforts maximum de compression et vérifier la compatibilité des efforts de traction à appliquer avec le câble à installer. Le calcul des efforts de déroulage et particulièrement de la compression est le « garde-fou » pour éviter des dégâts irréversibles sur le câble (arrachage de tête de tirage, découpage du fourreau...).

8- Transport de touret.
9- Stockage de touret.

8- Cable drum transport.
9- Cable drum storage.

CONCLUSION

La démarche de recherche et d'optimisation des LS HTB menée par RTE, tant en conception qu'en réalisation, a permis le déploiement croissant de liaisons de grande longueur durant la dernière décennie.

Elle a aussi permis de séquencer les travaux pour une meilleure acceptabilité vis-à-vis des riverains et des élus, tout



© CNER

10

en augmentant la part de mécanisation et les rendements, sans l'être au détriment de la qualité.

Toutefois, le critère économique reste sensible dès lors que le niveau de tension de 225 000 volts (HTB2) est atteint. Et ce d'autant plus s'il est nécessaire, pour de grandes distances (ex : interconnexion France-Espagne 65 km (figure 11)), de recourir à la technologie HVDC pour laquelle des stations de conversion entre courant alternatif et courant continu sont indispensables. □

10- Chambre de jonction préfabriquée en HTB1.

11- Déroulage sur France-Espagne.

10- Prefabricated junction chamber in HVB1.

11- Unwinding on France-Spain section.



© CNER

11

ABSTRACT

RTE AND ITS WORK ON UNDERGROUND LINKS

SERGE HASCOËT & FRÉDÉRIC LESUR, RTE

RTE operates, maintains and develops the French high and extra high voltage (HVB) electricity network. It has the largest network in Europe. In an adverse economic environment, RTE plans to modernise and expand its network by investing €1.5 billion per year. To do so, selected contractors perform part of the design work, supply and works for the HVB underground links. The underground construction of new structures is now conventional, and the most common laying method is to place cable ducts at the bottom of a trench, backfill the trench, and then pull the cables. The research, optimisation and quality approach of RTE, in both the design and execution stages, has enabled the deployment of a growing number of links, work sequencing to improve acceptability for nearby residents and elected authorities, while increasing the proportion of mechanisation for increased efficiency. □

RTE Y SUS OBRAS DE ENLACE SUTERRÁNEAS

SERGE HASCOËT & FRÉDÉRIC LESUR, RTE

RTE opera, mantiene y desarrolla la red francesa de electricidad de alta y baja tensión (HTB). Su red es la más importante de Europa. En un contexto económico difícil, RTE tiene previsto modernizar y desarrollar su red invirtiendo 1.500 millones de euros al año. Para hacerlo, distintas empresas seleccionadas se encargan de los estudios, los suministros y las obras de los enlaces subterráneos HTB. La construcción subterránea de las nuevas obras es hoy en día un procedimiento clásico, y el modo de instalación más habitual consiste en tender los conductos en el fondo de una zanja, terraplenarla y a continuación tirar los cables. El procedimiento de investigación, optimización y calidad aplicado por RTE, tanto en el diseño como en la realización, ha permitido desplegar cada vez más enlaces, secuenciar las obras para mejorar la aceptación de los vecinos y los municipios, aumentado a la vez la parte de mecanización y el rendimiento. □



1
© EDF

CONCEPTION ET INSTALLATION DES DIESELS D'ULTIME SECOURS (DUS) DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

AUTEURS : BERNARD TARDY, DIRECTEUR DU PROJET GMES, CLEMESSY - PATRICK DE LABRUSSE, CHEF DE PROJET DÉPLOIEMENT DUS, CLEMESSY - MARC KURC, CHEF DE PROJET DUS, CLEMESSY

CONSÉQUENCES DIRECTES DE LA CATASTROPHE DE FUKUSHIMA SURVENUE EN 2011 AU JAPON, LA TOTALITÉ DES CENTRALES NUCLÉAIRES FRANÇAISES DOIT ÊTRE ÉQUIPÉE D'UNE SOURCE ÉLECTRIQUE ULTIME. CLEMESSY, MANDATAIRE D'UN GROUPEMENT D'ENTREPRISES, A REMPORTÉ LE CONTRAT DE CONCEPTION, INSTALLATION ET MAINTIEN EN CONDITION OPÉRATIONNELLE DE 38 RÉACTEURS (DONT 2 OPTIONNELS) SUR LES 58 QUE COMPTE LE PARC FRANÇAIS. APRÈS DEUX ANNÉES D'ÉTUDES ET DE QUALIFICATION, CLEMESSY S'APPRÊTE À INSTALLER LA TRANCHE TÊTE DE SÉRIE.

LE PROJET

Suite au séisme et au tsunami qui a suivi, la centrale de Fukushima a perdu la totalité de ses alimentations électriques. Pour éviter cette situation et répondre aux prescriptions techniques de l'Autorité de Sécurité Nucléaire, le groupe EDF a pris la décision d'installer un Diesel d'Ultime Secours (DUS)

sur l'ensemble de ses 58 réacteurs. Chaque groupe électrogène (figure 2) sera affecté à une seule unité de production. Il s'ajoutera aux 5 sources électriques déjà existantes et devra fournir l'énergie électrique nécessaire à la mise à l'arrêt sûr et au maintien à l'arrêt en toutes circonstances, y compris en situation accidentelle cumulée.

1- Centrale de Saint-Laurent-des-Eaux.

1- Saint-Laurent-des-Eaux power station.

LE CONTRAT

LE GROUPEMENT

Dès 2012, EDF publie une demande d'information au niveau européen intitulé « Sourcing Groupe électrogène » dont l'objet est la recherche de fournisseurs/installateurs pour groupes électrogènes (Diesel ou Turbine à combustion) pour centrales nucléaires.

Clemessy Nucléaire (Branche Énergie du groupe Eiffage), déclare immédiatement son intérêt pour ce marché et pour ce faire, s'associe à Abc (Anglo Belgian Corporation, groupe Ogepar), constructeur expérimenté de moteurs Diesel, basé à Gand en Belgique.

Un accord d'exclusivité est signé entre les deux sociétés.

Clemessy anticipe que les futures prescriptions pour réaliser les études et les travaux seraient à exécuter dans des délais très courts. Dans ce contexte, Clemessy décide d'associer l'entreprise Orys filiale du groupe Ortec spécialisée dans les travaux nucléaire à ce projet ambitieux afin qu'elle complète les moyens d'études et de montage sur site. Ainsi, après deux appels d'offres successifs, le Groupement d'Entreprises Momentanées Solidaires (GMES) remporte en avril 2014 le marché pour la fourniture, le montage et le maintien

en condition opérationnelle de groupes électrogènes (installation électromécanique complète, livrée clés en main hors gros œuvre) à moteur Diesel d'Ultime Secours (DUS) pour les paliers 900 et 1 450 MW, soit 38 tanches dont 2 optionnelles.

LE PÉRIMÈTRE

Abc est le fabricant fournisseur des groupes électrogènes. Il a en charge les essais sur site et les formations ainsi que le maintien en condition opérationnelle des groupes.

2- Maquette du bâtiment HDU du Projet DUS.

2- Model of HDU building for the EDGS project.

Orys est l'installateur des équipements du GMES. Il a également à sa charge les études, la fourniture, le montage, les essais et la formation du système de ventilation, des équipements de manutention (pont roulant, potence, ...), des tuyauteries des systèmes auxiliaires du groupe électrogène et de l'extinction incendie.

Orys réalise sur site le levage et l'installation du groupe moto alternateur de 65 t.

Pilote du groupement, Clemessy s'est vu confié :

- La conception, qualification et fourniture des auxiliaires électromécaniques du groupe électrogène ;
- La conception, les qualifications et la fourniture des installations électriques générales (IEG) et installations électriques diverses (IED) ;
- Les études et préconisations Foudre ;

→ Les études des Mises À La Terre (MALT) ;

→ La conception, qualification et fourniture contrôle-commande ;

→ Les études globales d'ergonomie ;

→ Les études de Sécurité de Fonctionnement pour l'ensemble de l'installation ;

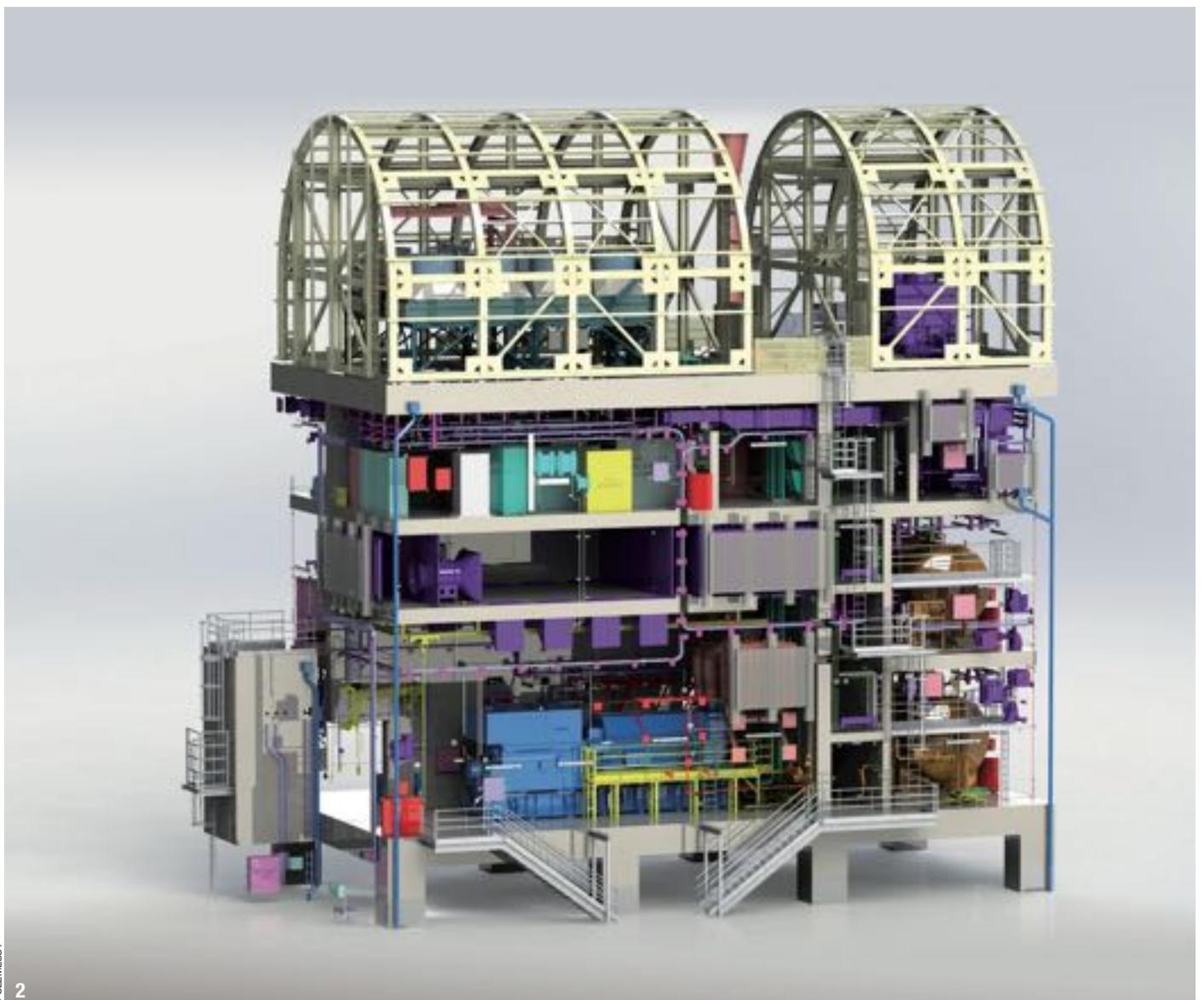
→ Les études et fournitures de la détection incendie (DI) ;

→ Le montage IEG/IED/MALT/DI ;

→ Les essais de requalification, formations, Maintien en Condition Opérationnelle (MCO) - Matériels et pièces de rechange propres à cette partie.

LES DÉLAIS, UN DÉFI À RELEVER

L'enjeu majeur de ce contrat réside dans les délais très courts de conception et de réalisation, avec des prescriptions imposées d'un niveau supérieur à l'existant. ▷



Ainsi à partir de la notification du marché, la durée globale du contrat est de 16 années : études, déploiement et maintien en condition opérationnelle. Clemessy Nucléaire a su mobiliser immédiatement les moyens humains et matériels indispensables à la tenue des échéances contractuelles (figures 3 et 4). Un véritable défi puisque le déploiement, conformément au planning prévisionnel imposé par EDF, prévoit de démarrer l'installation de la Tranche Tête de Série (TTS) de Saint-Laurent-des-Eaux (SLB1) dès l'été 2016. Un enjeu que les équipes du GMES ont su relever en réalisant les études de conception et l'ensemble des qualifications en seulement deux années (figure 5).

Après le démarrage de la TTS, le déploiement des 36 DUS du contrat ferme se terminera fin 2018. Le maintien en condition opérationnelle des groupes s'étendra alors sur 10 années, jusqu'en 2029.

LES ÉTUDES DE CONCEPTION

LA CELLULE DE MANAGEMENT

Dès l'attribution du contrat, Clemessy a mis en place une organisation renforcée afin d'assurer le pilotage du projet et garantir le respect des échéances (voir encadré sous la figure 6).

Une cellule de management a été implantée à Marseille à proximité de l'ingénierie client. Cette base « avant », pilotée par le directeur du projet du GMES, est assistée par deux cellules support : la cellule « Moyens logistiques et fonctionnels communs » et la cellule « Coordination d'Ingénierie » regroupant les compétences mises à disposition par chaque membre du groupement (figure 6).

ANALYSE FONCTIONNELLE ET SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

L'analyse fonctionnelle visant à situer le système DUS dans son environnement a permis :

- De définir les différents modes de fonctionnement requis pour l'installation ;
- De préciser les interactions entre les 13 systèmes élémentaires qui la composent.

Les contraintes prises en compte pour chacun des équipements et auxiliaires du DUS ont ensuite été déclinées sous l'angle de la sûreté de fonctionnement (SDF), associant aux techniques et matériels retenus, des taux de disponibilité compatibles avec les exigences du cahier des charges :



3



4

3- 360 tableaux électriques sont fabriqués par Tabelec, le département tableaux de Clemessy.

4- Fabrication de tableaux débrouillables série Cubic.

5- Les délais, un enjeu majeur du contrat.

3- 360 electrical switchboards are manufactured by Clemessy's switchboard department, Tabelec.

4- Manufacture of Cubic series draw-out switchboards.

5- Deadlines, a major challenge for the contract.

→ Taux de défaillance à la sollicitation : $\gamma < 1,33 \times 10^{-3}$ /démarrage ;

→ Taux de défaillance en fonctionnement : $\lambda < 6,66 \times 10^{-4}$ /heure.

De même chaque contrainte a été analysée sous l'angle de la conduite, regroupant dans un système élémen-

taire spécifique (KUS), les commandes et interfaces adaptées et nécessaires à l'exploitation (figures 7a et 7b).

LE CONTRÔLE-COMMANDE (CC)

Les équipements du contrôle-commande assurent les sécurités, le con-

trôle, la régulation, la commande, la signalisation et le diagnostic du système DUS.

Composés d'une armoire électrique et d'une Interface Homme-Machine, le système de CC pilote et contrôle les différents systèmes élémentaires et fournit

LES DÉLAIS, UN ENJEU MAJEUR DU CONTRAT



5

des informations d'échanges à divers systèmes environnants, notamment la salle de commande de la tranche.

Le fonctionnement des installations est entièrement automatisé, de manière à permettre son exploitation sans présence humaine, sauf mode de marche particulier (essais périodiques par exemple).

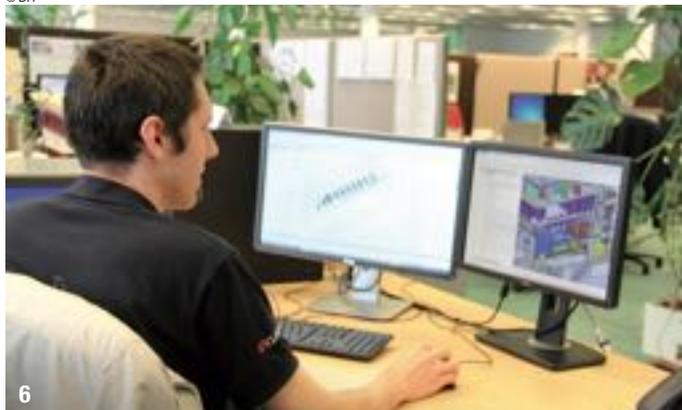
Différentes technologies sont présentes dans l'armoire de contrôle-commande :

- Automate K3/C3 qui assure le contrôle de la gestion du fonctionnement de l'installation, de marque Schneider Electric et de référence M340. Il s'agit du premier automate programmable à être installé sur un diesel de secours (le contrôle-commande étant habituellement réalisé en relai conventionnel sur ce type d'installation).
- Platine de vitesse analogique assurant la régulation de vitesse du moteur diesel.
- Interface Homme Machine (IHM) : numérique et conventionnelle permettant aux opérateurs d'interagir avec les différents systèmes élémentaires. Cette interface a été soumise à une étude d'ergonomie partagée avec les opérateurs de conduite (figure 8).
- Chaînes de sécurité prioritaires et non prioritaires assurant la protection des hommes et des équipements.

LA REVUE DE COHÉRENCE DE NIVEAU 1

Étape clé du processus projet chez EDF, la revue EC1 (État de cohérence de niveau 1) a permis de valider la défini-

© DR



6

HEURES DE MANAGEMENT ET D'ÉTUDES CLEMESSEY

- HEURES DE PILOTAGE GMES : 43 000 h**
- HEURES DE MANAGEMENT PROJET : 45 000 h**
- HEURES D'ÉTUDES : 116 000 h**
- HEURES DE MONTAGE, D'ESSAIS ET DE FORMATION : 580 000 h**
- MAINTIEN EN CONDITION OPÉRATIONNELLE (MCO) : 165 000 h**

6- L'intégralité de la conception a été réalisée sur la base d'une maquette 3D.

7a & 7b- Architecture du système.

6- All the design work was performed based on a 3D model.

7a & 7b- System architecture.

tion d'un état cohérent de conception et d'installation permettant de consolider les hypothèses de réalisation de la Tranche Tête de Série. Cet état cohérent est associé à une liste de points techniques, dont l'identification exhaustive et les solutions apportées assurent la conformité globale de la fourniture. À l'issue du retour d'expérience de la TTS, un état de cohérence de niveau 2 sera dédié à l'optimisation de l'installation et à la généralisation des bonnes pratiques constatées sur site. La définition des états cohérents permettra de suivre précisément les configurations

déclinées sur les différentes tranches des paliers 900 et 1 450 lors de la phase de déploiement.

LES QUALIFICATIONS ET ESSAIS

LES EXIGENCES DES CAHIERS DES CHARGES

Classement de sûreté

L'ensemble des matériels participant à la fonction de sûreté des nouveaux systèmes est IPS (Important Pour la Sûreté) avec requis sismique SND (Séisme Noyau Dur) pour les matériels électriques et mécaniques.

Classement sismique

Le système doit conserver son opérabilité pendant et après un séisme SND. Les effets induits par le séisme événement (matériel agresseur) sont pris en compte.

Classement des logiciels / systèmes programmes

Le système est soumis à l'application de la classe C3 selon le RCC-E 2012 § C5000 pour les systèmes programmes qui le composent. Pour les matériels de distribution électrique, l'utilisation de CEP - (Composant Electronique Programme) est proscrite.

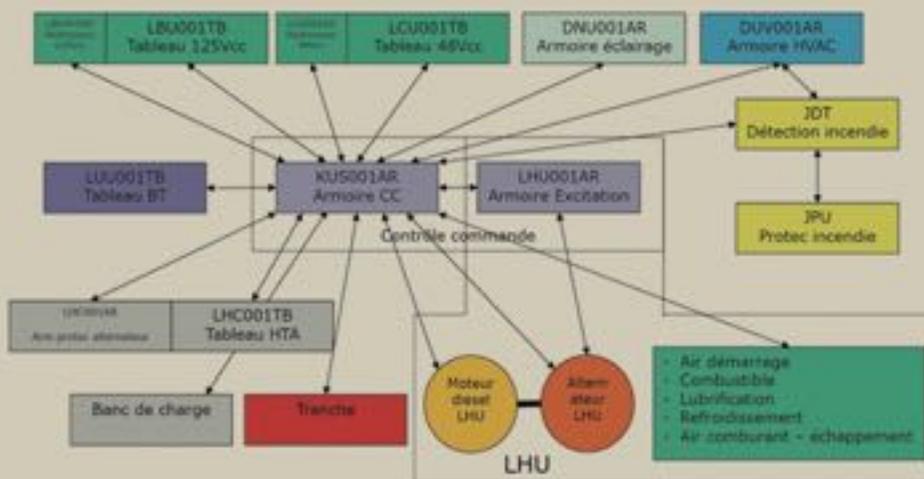
Qualification fonctionnelle et sismique

Tous les matériels classés IPS justifient d'une qualification fonctionnelle et sismique.

ESSAIS ET ANALYSES DES MATÉRIELS

Pour mener à bien les essais, Clemessy Nucléaire s'est appuyé sur les plus grands laboratoires français et européens. ▷

ARCHITECTURE DU SYSTÈME



© DR

7a

LHU : Groupe Électrogène DUS avec ses auxiliaires

LHC : Distribution Électrique 6,6 kV

LUU : Distribution Électrique 380 V

LBU : Distribution Électrique 125 Vcc

LCU : Distribution Électrique 48 Vcc

DNU : Éclairage et coffrets Prises

DUV : Ventilation comprenant le Chauffage, la Climatisation

JPU : Protection incendie du GE

JDP : Détection incendie du bâtiment HDU

DMU : Matériels de manutention

KUS : Contrôle Commande unique du HDU, hors contrôle-commande spécifique de l'HVAC

LTR : Circuit de Mise à la terre

YLH : Banc de Charge du Diesel

7b

Le vaste panel d'essais a nécessité une logistique importante.

Le fil d'essais a concerné les essais électriques préliminaires, les essais climatiques, les essais de vieillissement, les essais sismiques sur table vibrante, les essais électriques finaux ainsi que les essais de compatibilité électromagnétique.

Les réservoirs de carburant, les systèmes aéroréfrigérants, les échappements et admissions d'air ont fait l'objet d'une qualification par analyse.

QUALIFICATION K3 C3

Le contrôle-commande est soumis à une qualification K3 (Qualification environnementale fonctionnelle) et à une qualification C3 (Qualification logiciel applicatif).

Divers essais ont été réalisés pour attester de la tenue de l'automate et de son enveloppe aux exigences de la qualification K3 : Essais de résistance d'isolement - Essais de tenue diélectrique - Essais de tenue diélectrique au choc - Essais de tenue de surcharge - Essais d'intégrité - Essais de la non-agression CEM - Essais de l'influence de la température, de l'humidité - Essais de l'influence des perturbations électromagnétiques (champ magnétique, décharges électrostatiques, onde de choc...) - Essais de vibrations mécaniques - Essais de tenue au séisme (figure 9).

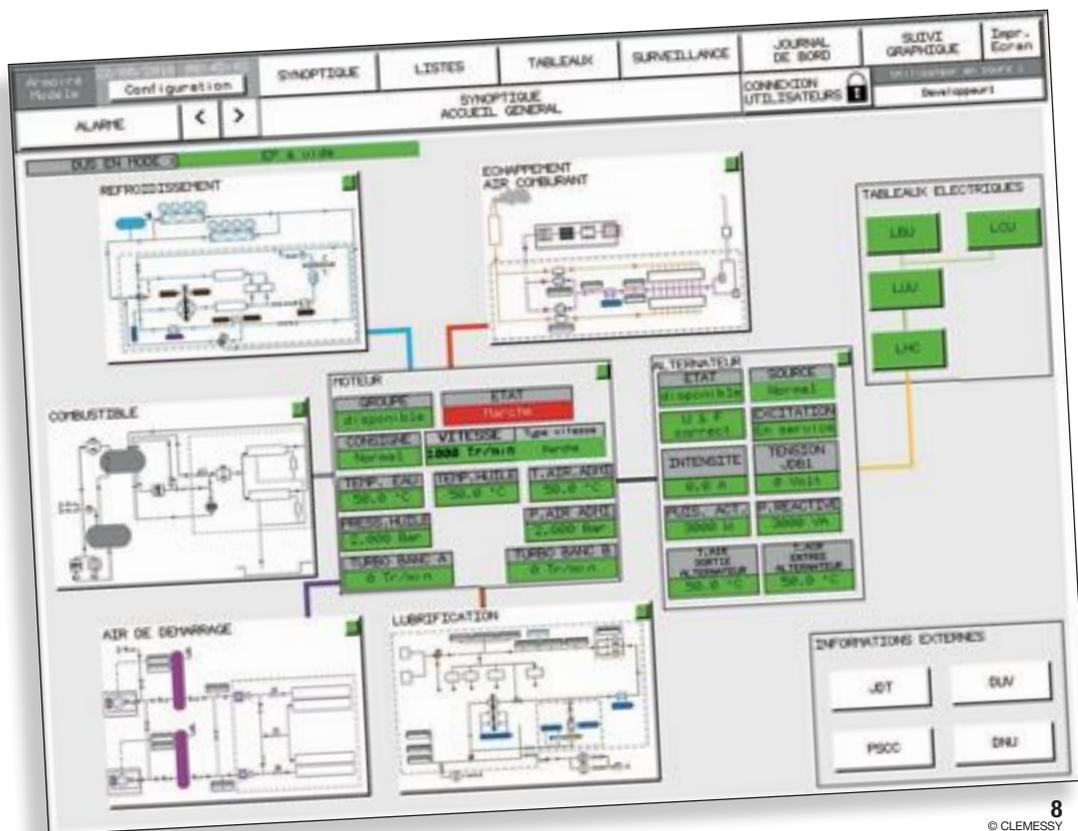
La qualification C3 consiste à démontrer que chaque exigence fonctionnelle définie dans le cahier des charges, a fait l'objet d'une intégration sous assurance qualité et que le logiciel du système programmé dispose ainsi d'un niveau de confiance suffisant au regard du cahier des charges.

La qualification du processus de développement du logiciel applicatif a été réalisée sur la base d'un cycle en V selon les exigences du RCCE.

Le niveau de confiance C3 est évalué de façon exhaustive pour chaque exigence élémentaire du cahier des charges via des matrices de conformité et des activités de revue et de traçabilité. Un raisonnement qualitatif et quantitatif permet tout au long du cycle de développement (conception, intégration et validation), d'assurer la maîtrise des étapes de la qualification.

LES ESSAIS DU CONTRÔLE-COMMANDE

Les **essais unitaires** ont démontré que les modules codés sont conformes aux spécifications élaborées au cours de la phase de conception détaillée.



8 © CLEMESSY

Ils sont en lien direct avec la vérification de la note de conception détaillée de l'automate.

Les **essais d'intégration** permettent de contrôler chaque armoire de contrôle-commande de la série, avec son programme automate en fonctionnement et raccordée physiquement à un simulateur, en déroulant une procédure d'Exécution d'Essais propre au système KUS. C'est aussi à ce moment qu'un déverminage de l'armoire de contrôle-commande est réalisé, consistant en un fonctionnement sans interruption durant 168 h. Ces essais sont

en lien direct avec la vérification des analyses fonctionnelles.

Les **essais de validation** consistent à réaliser des tests fonctionnels de l'armoire contrôle-commande modèle dans un environnement le plus proche possible du système final.

Ces essais ont été réalisés en plateforme en deux temps.

Sur le chantier école (voir ci-après)

Sur le banc d'essai du motoriste Abc à Gand :

→ L'armoire contrôle-commande a été interfacée directement avec le moteur diesel en configuration site ;

8- Exemple de vue IHM numérique.

9- Armoire Contrôle-Commande en essais sismiques sur table vibrante.

8- Example of digital HMI view.
9- Monitoring and control cabinet undergoing seismic tests on vibrating table.



9 © CLEMESSY



© CLEMESSY
10

- Réalisation des modes de fonctionnement prévus au cahier des charges (Essais Périodiques à vide, en charge, attente conditionnée et ultime secours) ;
- Contrôle du bon fonctionnement des chaînes de régulation ;
- Essais en situation dégradée (perte de l'automatisation, de la régulation, défauts prioritaires présents...) ;
- Divers essais fonctionnels.

ANTICIPATION ET ORGANISATION DU DÉPLOIEMENT

PRÉFABRICATION ET LOGISTIQUE
Pour ses propres travaux, Clemessy s'est fixé comme objectif de réduire au maximum les heures de montage

10- Chantier école et plateforme de formation.

10- Apprentice workshop and training platform.

sur site et de capitaliser sur la grande répétitivité des interventions. Ainsi, l'identification des activités pouvant être anticipées avant la mise à disposition du bâtiment a été effectuée très en amont de la phase montage de la première unité. Sur la base de cette analyse, il a été décidé de pré-assembler le plus d'éléments possibles

hors du site et avant le début de l'intervention.

Une cellule logistique dédiée gère l'ensemble du processus : réception de composants, redistribution vers les ateliers spécialisés, réception des sous-ensembles, emballage, stockage, expédition vers la tranche concernée.

CHANTIER ÉCOLE

Une plateforme permanente regroupant l'ensemble des équipements électriques principaux a été assemblée dans les locaux de Clemessy. Afin d'anticiper toute difficulté potentielle au montage des équipements principaux, une étude de constructibilité complète a été menée et le montage de la plateforme effectué en chantier

école. L'armoire contrôle-commande « modèle » y a été installée définitivement et permettra en cas d'évolution, une requalification fonctionnelle (figure 10).

Cette plateforme permettra la formation des exploitants pendant les 10 ans du maintien en condition opérationnelle.

MOBILISATION PROGRESSIVE

Toutes ces préparations vont maintenant être mises en œuvre pour la construction de la première tranche au terme de laquelle une analyse approfondie des retours d'expérience permettra de valider les processus ou de les corriger.

Une direction de travaux forte est mise en place pour coordonner l'activité des partenaires intervenant pendant la phase montage et permettre ainsi la prise de décision rapide.

Au plus fort du projet, le planning prévoit jusqu'à 10 tranches en parallèle. □

CHIFFRES CLÉS PÉRIMÈTRE CLEMESSY

- 360** tableaux électriques
- 36** transformateurs 800 kVA
- 720** équipements auxiliaires mécaniques
- 504** coffrets prises de courant
- 4 400** luminaires
- 40** km de chemin de câbles
- 330** km de câbles
- 1 400** détecteurs incendie

ABSTRACT

DESIGN AND INSTALLATION OF EMERGENCY DIESEL GENERATING SETS (EDGS) FOR THE FRENCH NUCLEAR FLEET

BERNARD TARDY, CLEMESSY - PATRICK DE LABRUSSE, CLEMESSY - MARC KURC, CLEMESSY

Clemessy (Eiffage Group) has won the contract for supply, assembly and in-service support for the emergency diesel generating sets (EDGS) for all the 900 and 1450 MW series of the French nuclear fleet, i.e. 38 units in all, two of which are optional. This turnkey contract awarded by EDF will be executed within the framework of a temporary consortium of joint contractors. Clemessy, the leader of the consortium, will supply all the electrical and monitoring and control systems for the generator auxiliaries. Abc Diesel will supply the generating sets and Orys, a subsidiary of Ortec group, will provide the ventilation system, piping for the auxiliary systems, and assembly of electromechanical equipment. The emergency diesel generating sets form part of the post-Fukushima programme implemented by EDF to enhance power-station safety. □

DISEÑO E INSTALACIÓN DE LOS GENERADORES DIÉSEL DE EMERGENCIA DEL PARQUE NUCLEAR FRANCÉS

BERNARD TARDY, CLEMESSY - PATRICK DE LABRUSSE, CLEMESSY - MARC KURC, CLEMESSY

Clemessy (Grupo Eiffage) ha logrado el contrato de suministro, montaje y mantenimiento en condiciones operativas de los grupos electrógenos con motor diésel de emergencia para todas las etapas de 900 y 1.450 MW del parque nuclear francés, que suman un total de 38 tramos, dos de ellos opcionales. Este contrato llave en mano encargado por EDF se llevará a cabo en el marco de un consorcio temporal de empresas solidarias. Clemessy, representante del consorcio, suministrará el conjunto de los sistemas eléctricos y de control-mando de los sistemas auxiliares de los grupos; Abc Diesel suministrará los grupos electrógenos y Orys, filial del Grupo Ortec, se encargará del sistema de ventilación, las tuberías de los sistemas auxiliares y el montaje de los equipos electromecánicos. Estos generadores diésel de emergencia se inscriben en el programa post-Fukushima implementado por EDF para reforzar la seguridad de las centrales. □



1

© G.T.S.

REMPLACEMENT DE LA CONDUITE DE REFOULEMENT DE POMPAGE AU LAC D'ARTOUSTE (64)

AUTEURS : LAURENT VIGUIER, CHEF DE SECTEUR, G.T.S. MIDI-PYRÉNÉES - BERTRAND DELATTRE, CONDUCTEUR DE TRAVAUX, G.T.S.

DANS LE CADRE DE TRAVAUX DE MAINTENANCE PRÉVENTIVE, LA SOCIÉTÉ HYDRO-ELECTRIQUE DU MIDI (SHEM, GROUPE ENGIE) A MISSIONNÉ L'ENTREPRISE G.T.S. (NGE) POUR LE REMPLACEMENT DE LA CONDUITE FORCÉE DE REFOULEMENT DE L'USINE D'ARTOUSTE (64). PERCHÉ À 2000 M D'ALTITUDE, LE SITE N'ÉTAIT ACCESSIBLE QU'EN HÉLICOPTÈRE. EN RÉPONSE À LA COMPLEXITÉ DE L'OPÉRATION, QUI PLUS EST EN PÉRIODE HIVERNALE, UNE SOLUTION MULTITECHNIQUE A ÉTÉ PROPOSÉE. DIFFÉRENTES COMPÉTENCES ET D'IMPORTANTES MOYENS MATÉRIELS ONT ÉTÉ MOBILISÉS DEPUIS L'INSTALLATION DE LA BASE VIE EN ALTITUDE, LE TRAVAIL SUR CORDE (PENTE À 45°), LE SAVOIR EN REMONTÉE MÉCANIQUE ET EN ÉLECTRONIQUE.

LES SECRETS D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE

Dans les années 1920, un chantier exceptionnel a permis la construction du barrage d'Artouste (figure 1), le plus haut édifice de l'ensemble hydroélectrique de la vallée d'Ossau. Plus de 2000 ouvriers et des tonnes

de matériel sont acheminés à près de 2000 m d'altitude. À l'issue de ce chantier, la vallée d'Ossau devient un des plus importants sites de production d'hydroélectricité en France.

C'est une activité phare de la vallée et depuis plus de 100 ans, la SHEM produit une énergie propre et 100% renouvelable grâce à l'eau de la vallée.

1- Vue du barrage d'Artouste à 1997 m d'altitude.

1- View of the Artouste dam at an altitude of 1997 m.

TOUT UN COMPLEXE HYDROÉLECTRIQUE

À 2000 m d'altitude, le barrage d'Artouste (figure 2) et son usine forme le 1^{er} élément d'un véritable complexe hydroélectrique. L'eau turbinée est rejointe par les eaux d'autres barrages. Ces eaux sont ensuite turbinées plusieurs fois par les usines implantées



2

© ALEXIS FRESPEUECH

le long du Gave d'Ossau : Artouste, Miègebat, le Hourat... L'ensemble permet de produire 586,8 GWh d'électricité, soit l'équivalent de la consommation annuelle de la population d'une ville comme Bordeaux.

ENTRETIEN ET SUIVI DES INSTALLATIONS

L'ensemble des installations hydroélectriques fait l'objet de suivi et d'entretien régulier dans le souci de répondre au plus vite aux demandes d'électricité en période de pointe. L'entretien est réalisé en interne par les collaborateurs spécialisés de la SHEM grâce à son propre atelier de maintenance à Laruns.

En 2014, la Société Hydro-Électrique du Midi a investi quatre millions d'euros dans les travaux de maintenance et de modernisation sur ces installations en vallée d'Ossau. Par exemple, l'usine de Miègebat a été modernisée et celle de Bioux a vu sa partie électrique remise à neuf. Dans cette même logique a été programmé, en 2015, le chantier complexe du remplacement de la conduite forcée du lac d'Artouste située dans une galerie souterraine.

INTERVENTION ULTRA-TECHNIQUE EN ALTITUDE

En tant que spécialiste des travaux géotechniques et de sécurisation, G.T.S. maîtrise les interventions en milieu montagne aux accès souvent difficiles. Pour ce chantier, les travaux avaient pour objet principal le remplacement

2- Le lac d'Artouste, situé à 1997 m d'altitude, est un lac naturel d'origine glaciaire, dans la vallée d'Ossau.

3- Localisation de la galerie souterraine à la sortie du barrage d'Artouste.

2- Artouste lake, located at an altitude of 1997 m, is a natural lake of glacier origin, in Ossau Valley.

3- Location of the underground gallery at the exit of Artouste dam.

de la conduite de refoulement (figure 3) qui passe dans l'usine souterraine d'Artouste. Cette conduite sert à réalimenter le lac d'Artouste sur des périodes très courtes, en tenant compte des besoins de production. La conduite existante était une conduite en acier de diamètre 800 mm, située dans une galerie inclinée à 45° de section en fer à cheval de 3,20 m de base et de 2,20 m de hauteur. Les principales difficultés de cette opération de remplacement étant :

- Les contraintes d'accès et la période de réalisation des travaux (une partie des travaux en plein hiver) (figures 4 et 5) ;
- L'environnement sensible avec les organes électromécaniques et électriques à proximité de la zone de travaux (figures 6 et 7) ;

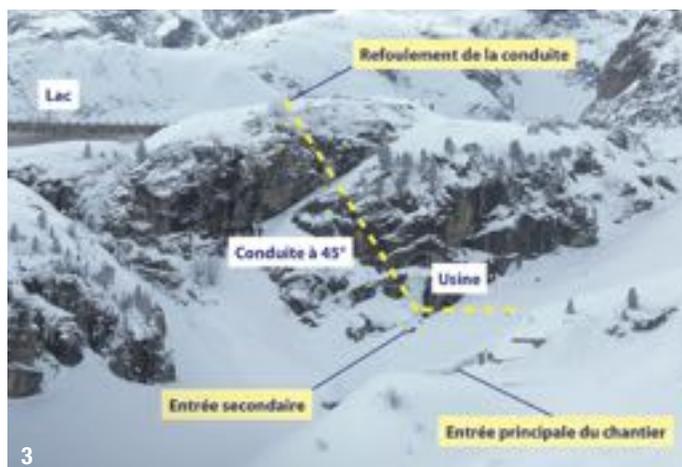
- La nécessité de rétablir un outil de levage approprié aux contraintes de site ;
- La présence d'amiante sur la conduite existante ;
- Les travaux en milieu confiné.

MODES DE TRANSPORTS ADAPTÉS À LA HAUTE MONTAGNE

Chaque semaine, le personnel est acheminé à la base chantier en 8 mn par hélicoptère. En cas de mauvais temps, un autre mode d'accès est possible en 1h30 par télécabine et train d'altitude pendant la période estivale, ou par un tracteur avec remorque dans une galerie souterraine de 13 km et téléphérique pour les périodes hivernales.

Quant aux matériels et matériaux, l'amenée-repli s'est effectué uniquement par hélicoptère (figures 8 et 9) puis par une galerie de 150 m de long sur 2 m de diamètre pour accéder au chantier (utilisation d'un buggyscopique et d'un sambon pour l'acheminement final dans la galerie).

L'ensemble du matériel a été préparé avant intervention (conception et fabrication des supports, commandes des tubes) avec suffisamment d'anticipation afin d'éviter tout temps mort durant la phase de réalisation du chantier, y compris en cas de mauvaise météo durant plusieurs jours ne permettant pas l'accès en hélicoptère.



3

© G.T.S.



4
© G.T.S.



5
© G.T.S.

Concernant la gestion de la base vie, en fonction du nombre de personnes composant l'équipe, une personne était partiellement ou totalement affectée à la réalisation des repas et au nettoyage du gîte.

Lors des périodes nécessitant le moins de personnel, cette personne venait s'ajouter pendant quelques heures chaque jour dans les équipes de chantier pour des tâches de maçonnerie ou de manutention.

Dans le planning du chantier, pas de co-activité possible pour cause de superposition inévitable. La phase de préparation des supports et de pose des conduites a ainsi été réalisée en postes de manière à optimiser les installations et à respecter le délai de réalisation.

Enfin, un suivi quotidien de la météo locale était réalisé pour préparer

4 & 5- Entrée principale du chantier été/hiver.

6- Schéma de profil de la conduite forcée à changer.

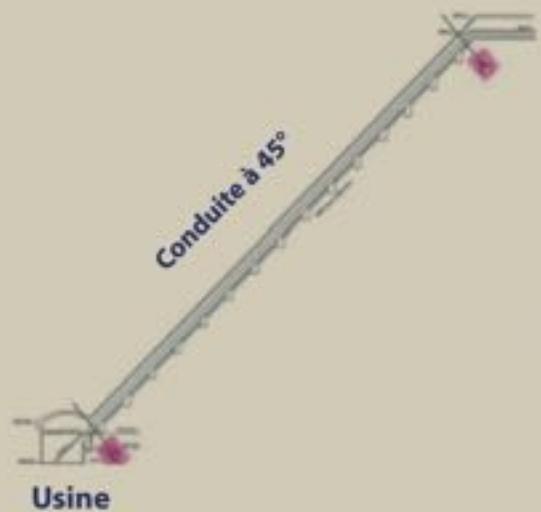
7- Schéma vue de dessus de l'installation hydroélectrique.

4 & 5- Main entrance to the site, summer/winter.

6- Profile diagram of the pressure pipe to be changed.

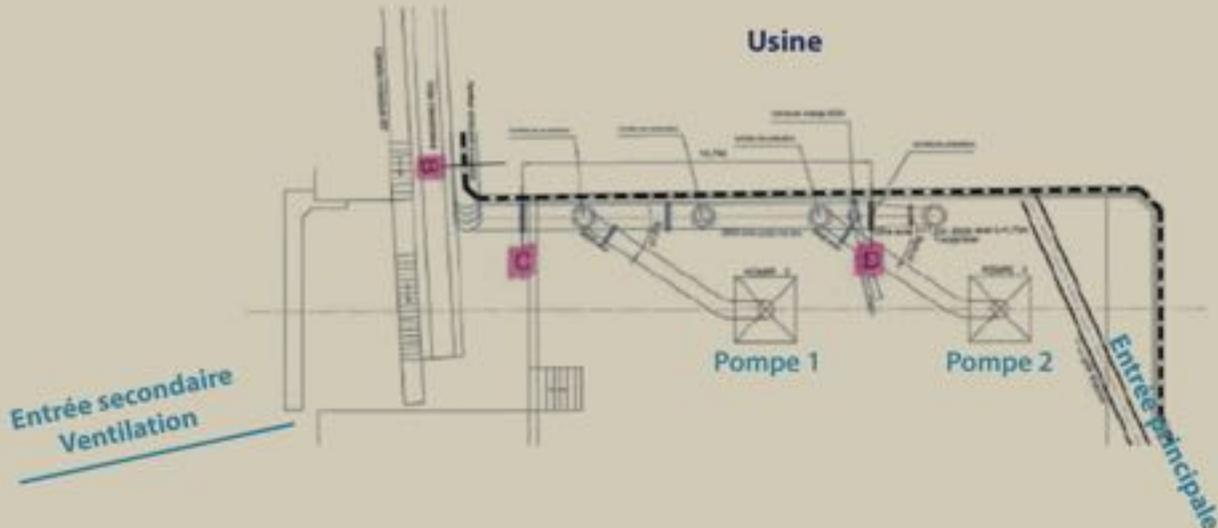
7- Plan view diagram of the hydropower installation.

SCHÉMA DE PROFIL DE LA CONDUITE FORCÉE À CHANGER



6
© DR

SCHÉMA VUE DE DESSUS DE L'INSTALLATION HYDROÉLECTRIQUE



7
© DR



8
© PASCAL LE DOARÉ



9
© PASCAL LE DOARÉ

les amenées et replis du personnel (figure 10) ainsi que son acheminement, sachant que les conditions météorologiques en montagne sont très changeantes d'une vallée à l'autre et d'une heure à l'autre. Il est arrivé à plusieurs reprises que le chantier soit décalé dans la semaine pour cause d'inaccessibilité, que ce soit par impossibilité de vol de l'hélicoptère ou indisponibilité des installations permettant l'accès par la galerie souterraine de la SHEM.

PRÉCAUTIONS RENFORCÉES DANS UN ENVIRONNEMENT SENSIBLE

L'équipe de G.T.S. a pris en compte la caractéristique hautement sensible des organes électromécaniques et électriques situés à proximité de la zone de travaux. Elle a donc mis en place une protection complète contre la poussière du matériel de l'usine (figure 11) : transformateurs, pompes, automates, etc. par des bâches couvrantes (figures 12 et 13).

Comme dans de nombreuses installations hydroélectriques datant de l'après-guerre, la présence d'amiante sous forme d'enduit bitumineux sur les conduites a complexifié les opérations de dépose de l'existant nécessitant l'intervention d'une entreprise qualifiée en sous-section 3.

Dans ce contexte, un mode opératoire particulier a été mis en place comprenant :

- Le décapage des zones de découpe pour limiter la diffusion d'amiante lors de la découpe ;
- La découpe à la torche plasma (qui vitrifie l'amiante au lieu de la disperser) puis la dépose des tubes en respectant les contraintes de travail en sous-section 3 ;
- La création d'un système de douche en sortie de l'usine pour ne pas polluer la galerie d'accès ;
- Enfin, un ensachage soigné permettant un hélicoptage sans risque.

Le travail en galerie impose une ventilation forcée afin d'assurer une qualité

8 & 9- Transport par hélicoptage, unique moyen d'amenée-repli de l'équipe et du matériel.

10- Suivi météo quotidien afin d'anticiper les transports.

11- Protection du matériel de l'usine.

8 & 9- Transport by helicopter, the only means to bring the team and equipment in and out.

10- Everyday monitoring of the weather in order to plan for transport.

11- Protection of the plant's equipment.

d'air convenable au personnel. Dans cet objectif, l'équipe de G.T.S. a mis en place une turbine en partie basse du chantier et un extracteur en partie haute.

L'air a naturellement un mouvement ascendant à l'intérieur de la galerie (figure 14).

De plus, un contrôleur d'air avait été installé pour prévenir le personnel en cas de saturation de l'atmosphère en gaz toxiques et notamment en monoxyde de carbone.

MATÉRIEL DE LEVAGE ADAPTÉ À UN SITE EXIGU

Intervenir en milieu confiné et exigu implique souvent une phase d'adaptation du matériel. Pour cette opération, G.T.S. a établi un outil de levage adapté aux contraintes du site d'Artouste :

- Création d'un monorail en plafond (figure 15) pour cheminement dans l'usine et le remplacement des conduites en acier placées horizontalement dans l'usine ;



10
© PASCAL LE DOARÉ



11
© G.T.S.

- Dépose pour adaptation d'un ascenseur incliné afin de déplacer les tubes lors de la dépose et de la repose (figures 16 et 17) dans la partie inclinée à 45°, pour cela, des relevés topographiques ont été nécessaires pour vérifier le gabarit disponible pour le chariot (figure 18) ;
- Création de brides pour la manutention des tubes par les divers moyens de levage (figure 19) ;
- Transport des tubes, de leur support et du béton par benne accrochée au chariot de l'ascenseur incliné pour les travaux dans la partie à 45°.

SOUPLESSE DE GESTION D'UN CHANTIER MULTI-TECHNIQUE

La présence d'amiante a nécessité la réalisation de procédés de manutention utilisables par tous, notamment pour les travaux de dépose exécutés par une société extérieure ne possédant pas les compétences pour la conception et la réalisation de moyens de levage et de manutention en milieu difficile. Une solution technique innovante a été proposée pour le remplacement des conduites avec des éléments en PRV de chez Flowtite (figure 20) (matériau à base de fibre de verre, silice et résine polyester insaturée). Ce matériau permet d'avoir la résistance nécessaire pour contenir plus de 10 bars de pression tout en limitant le poids (moins de 500 kg pour un tube de 6 m en Ø 800 mm). Par sa composition, ce matériau est six fois moins lourd que l'acier et dix fois moins lourd que le béton. Il possède une durée de vie de 50 ans minimum, résiste à la corrosion,

aux UV, aux PH de 1 à 10. Les caractéristiques de ce matériau et sa facilité de mise en œuvre par simple emboîtement ont été un atout important dans la réussite de la pose dans la pente à 45° (figures 21 et 22).

12- Sas de nettoyage des tubes avant sortie.

13- Sas pour l'entrée et la sortie du personnel de la zone de travail en milieu amianté.

14- Schéma de la ventilation à l'intérieur de la galerie.

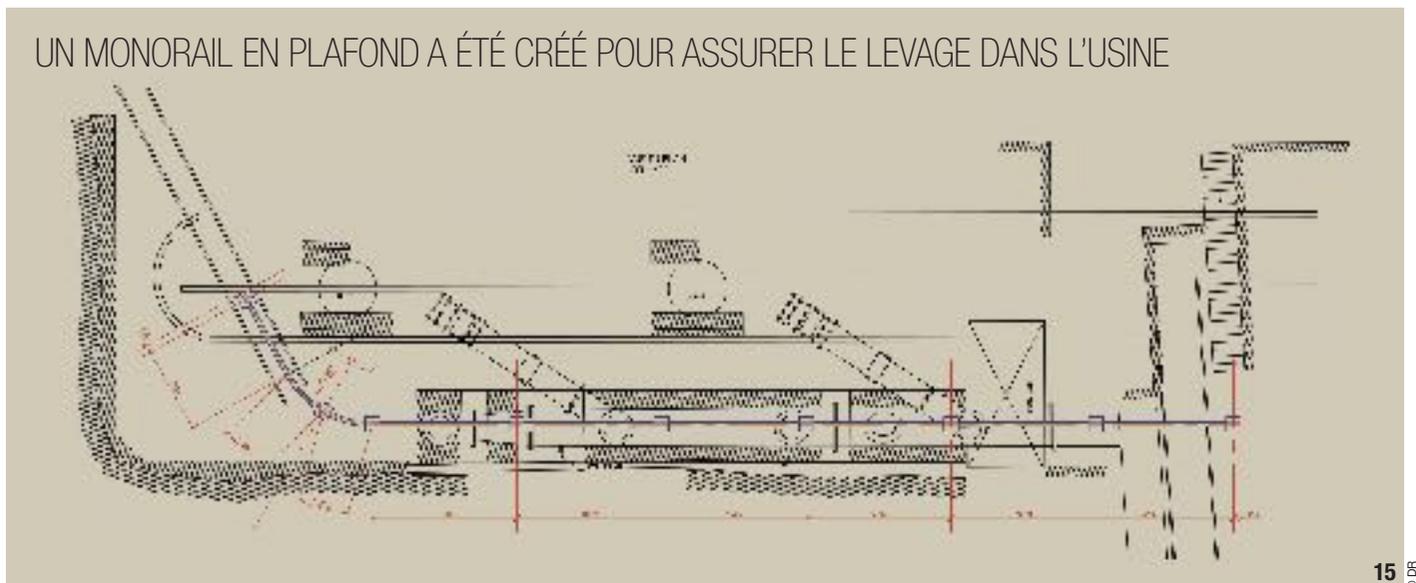
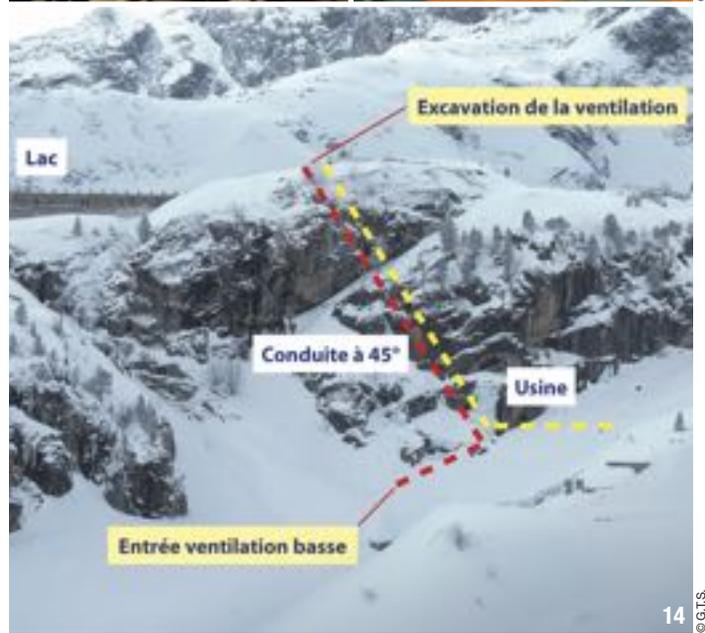
15- Un monorail en plafond a été créé pour assurer le levage dans l'usine.

12- Air lock for cleaning the tubes before exit.

13- Air lock for personnel entering and leaving the work area in an asbestos-contaminated environment.

14- Diagram of the ventilation system inside the gallery.

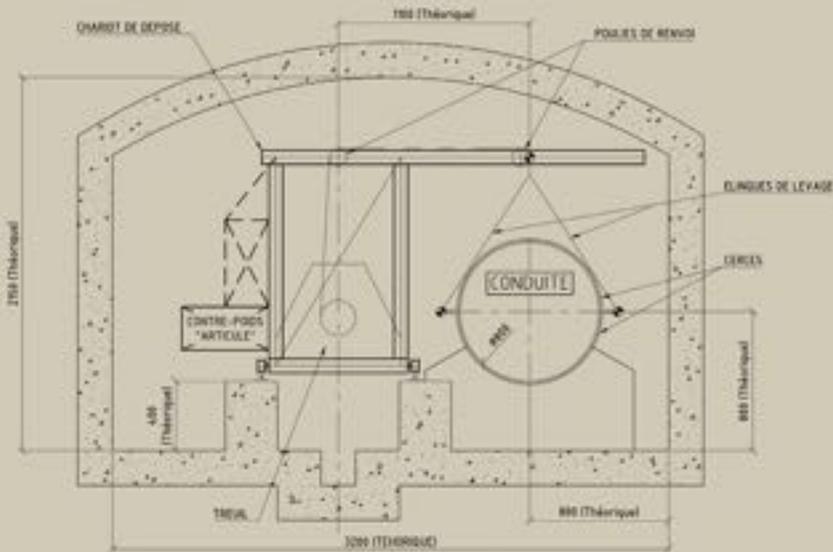
15- An overhead monorail was set up to perform lifting in the plant.



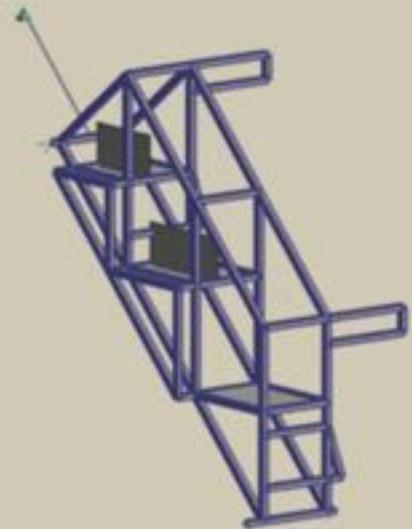
© G.T.S. © G.T.S.

GALERIE SHEM D'ARTOUSTE

Croquis de principe de dépose et repose de conduite



CHARIOT CONÇU EN REMPLACEMENT DE LA CABINE DE L'ASCENSEUR INCLINÉ POUR LE TRANSPORT DES CONDUITES



16

17



18



19

16- Galerie SHEM d'Artouste, croquis de principe de dépose et repose de conduite.

17- Chariot conçu en remplacement de la cabine de l'ascenseur incliné pour le transport des conduites.

18- Ascenseur incliné pour transporter les tubes.

19- Vue de la salle de pompage avec le départ de l'ascenseur incliné sur la gauche.

16- Artouste SHEM gallery, schematic sketch of pipe removal and remounting.

17- Carriage designed to replace the cabin of the inclined lift for transporting pipes.

18- Inclined lift for transporting tubes.

19- View of the pump room with departure of the inclined lift on the left.

SAVOIR-FAIRE TRÈS POINTU POUR UNE OPÉRATION DÉLICATE

La démolition et une adaptation des anciens supports de la conduite ont été nécessaires pour permettre la mise en place des nouveaux appuis métalliques du fait de l'exiguïté du site autant dans sa largeur que dans sa hauteur pour permettre l'acheminement des tubes. Ces nouveaux supports ont d'ailleurs été conçus avec un système de réglage sur tiges filetées de manière à permettre une adaptation de la hauteur par rapport au sol existant qui n'était pas régulier.

Une fois les tiges réglées précisément à l'aide d'un théodolite, G.T.S. a procédé à un bétonnage des pieds pour protéger les aciers de la corrosion (figure 23). Cette opération permet aussi de conforter la stabilité des appuis après intégration de canalisations, laissant le passage des eaux de ruissellement sans entrer en contact avec les supports de conduites.

Les raccordements à l'existant des nouvelles canalisations se sont faits par la mise en place de brides sur les parties conservées.

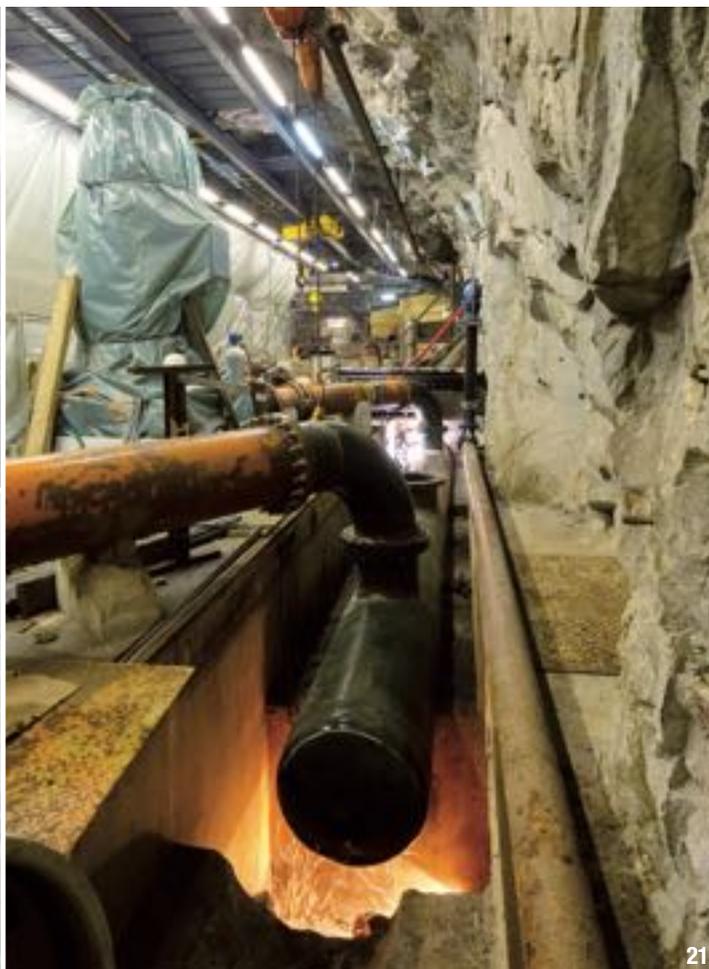
Ces opérations ont nécessité l'intervention de tuyauteurs et de soudeurs hautement qualifiés, que ce soit pour le calcul des découpes des différents angles que pour la réalisation de soudures dans des positions difficiles et devant résister à des pressions importantes.



20



22



21

FIGURE 20 © G.T.S. - FIGURES 21 ET 22 © PASCAL LE DOAIRE

Un contrôle par magnétoscopie a été réalisé en fin des opérations pour valider la bonne qualité des soudures réalisées.

D'autre part, l'équipe de G.T.S. a dû intégrer des regards de visite dans les nouveaux tubes (figure 24), opération qui est transparente pour les tubes en PRV du fait que les piquages et trous d'hommes sont réalisés en usine. La création de trous d'homme et de piquages sur les conduites en acier demande un savoir-faire très pointu de la part du tuyauteur et du soudeur. Ces travaux ont été l'occasion de procéder au remplacement de la canalisation des eaux de ruissellement dans la partie inclinée de la galerie pour garantir une meilleure tenue de l'ouvrage dans le temps. Les eaux de ruissellement présentaient un risque d'érosion sur les massifs d'appui de la conduite.

MOBILISATION DE MOYEN MATÉRIEL

La dernière phase de cette opération a consisté à recréer un massif de blocage en pied de conduite afin d'absorber la poussée de la colonne d'eau dans la galerie.

Ce massif, dimensionné par le bureau d'études interne de G.T.S., a nécessité des moyens de mise en œuvre particuliers.

D'un poids de 30 t, coulé autour des coudes aval, G.T.S. a opté, en raison de l'éloignement de l'entrée de la galerie, pour un transport par voie sèche plutôt qu'un transport par voie humide. Ce dernier demande un matériel difficile à hélicopter. L'option d'une réalisation sur place n'a pas été retenue car elle aurait généré plus de poussière, de désagréments pour le personnel et de nettoyage dans ce milieu confiné. Cette phase très technique a demandé une organisation minutieuse du point de vue matériel :

- Hélicoptage de 5 compresseurs ;
- Mise en place de 3 cuves à fioul avec des rotations fréquentes pour le remplissage ;
- Démontage et remontage de la machine de projection pour la rendre transportable par hélicoptère ;
- Mise en place d'une cuve tampon sur l'air comprimé pour optimiser le fonctionnement des 5 compresseurs ;
- Acheminement des convoyeurs ;

20- Tube PRV (matériau à base de fibre de verre), masse volumique environ deux fois inférieure à celle de l'acier pour une tenue à une pression de 15 bars.

21- adaptation du tube en cours (réalisation des piquages).

22- Montage du tube en cours.

20- GRP (glass reinforced plastic) tube, density about two times less than that of steel for resistance to a pressure of 15 bar.

21- Tube adaptation in progress (execution of offtakes).

22- Tube assembly in progress.

- Et un petit imprévu : l'utilisation d'huile pneumatique antigel pour éviter la prise en glace des canalisations d'air à cause des températures hivernales, y compris dans la galerie.

MOBILISATION DE COMPÉTENCES MULTIPLES

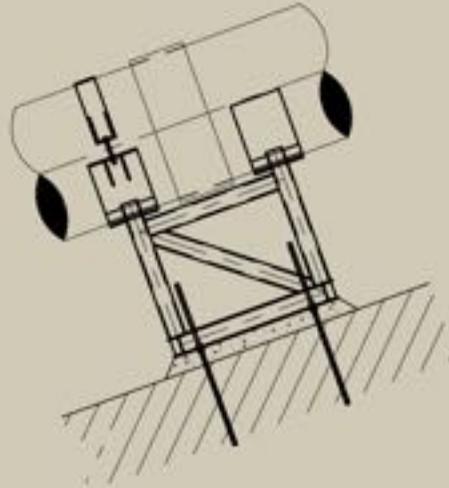
Les équipes ont tenu un planning très serré dans des conditions extrêmes avec pour objectif la remise en service de l'usine en mai.

Au final, ce sont de multiples compétences qui ont permis la réalisation de ce chantier :

- Des cordistes pour la réalisation des structures en plafond et des sécurisations pour le travail dans la pente à 45° (figure 25) ;
- Des personnes agréées pour le travail en sous-section 3 ;
- Des personnes compétentes en remontées mécaniques et en électronique pour l'adaptation des moyens de levage et de l'ascenseur incliné ;
- Des tuyauteurs et soudeurs hautement qualifiés, complétés par un contrôleur agréé Cofrend 2 ;

SCHÉMA DE PRINCIPE DES PILETTES MÉTALLIQUES SUPPORTANT LA CONDUITE

dont la base est noyée dans le béton afin de protéger l'acier de l'humidité de la galerie



23- Schéma de principe des pilettes métalliques supportant la conduite, dont la base est noyée dans le béton afin de protéger l'acier de l'humidité de la galerie.

24- Implantation et intégration par G.T.S. des regards de visite dans les nouveaux tubes.

23- Schematic diagram of the small steel piers supporting the pipe, whose base is embedded in concrete in order to protect the steel from the moisture in the gallery.

24- Installation and incorporation of inspection chambers in the new tubes by G.T.S.

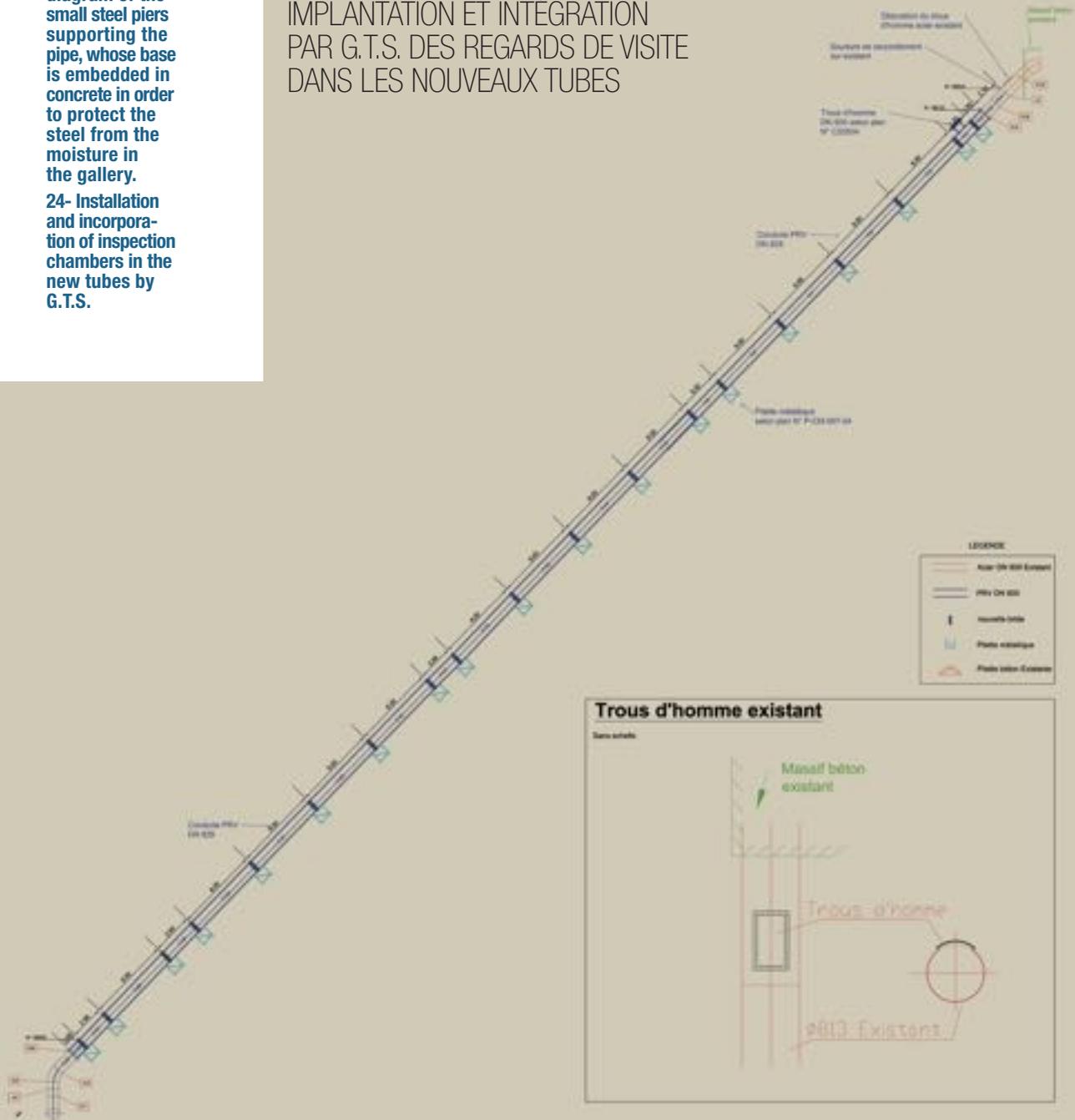
- Des maçons-coffreurs maîtrisant la technique du béton projeté par voie sèche ;
- Tout ce personnel a été formé pour l'assistance aux héliportages ;
- Et aussi un cuisinier pour assurer la gestion de la base vie.

CONCLUSION

Construit dans les années 1920, le barrage d'Artouste est le plus haut édifice hydroélectrique de la vallée d'Ossau. Celle-ci compte parmi les plus importants sites de production en France.

© DR 23

IMPLANTATION ET INTÉGRATION PAR G.T.S. DES REGARDS DE VISITE DANS LES NOUVEAUX TUBES



© DR 24



25

© PASCAL LE DOARE



26

© PASCAL LE DOARE

Depuis plus de 100 ans, la SHEM produit une énergie propre 100 % renouvelable grâce à l'eau de la vallée. À 2 000 m d'altitude, le barrage d'Artouste et son usine forment le 1^{er} élément d'un véritable complexe hydroélectrique. Depuis 2010, la SHEM

a programmé un vaste plan de maintenance préventive et de modernisation de ses installations en vallée d'Ossau. Le remplacement de la conduite forcée de l'usine sous le lac d'Artouste est un des chantiers complexes de ce programme.

25- 95 m de la conduite est en pente à 45°.

26- Travaux en milieu confiné pour le remplacement de la conduite forcée d'Artouste.

25- 95 m of pipe is on a 45° gradient.

26- Work in a confined environment for replacement of the Artouste pressure pipe.

La réussite de cette opération de grande ampleur est le résultat d'une coordination complexe mais efficace. L'intervention des différentes équipes dans des conditions extrêmes a rajouté à la difficulté d'accès au site.

Le remplacement de la conduite forcée de refoulement de l'usine d'Artouste (64) (figure 26) est une très belle référence technique dans le domaine hydraulique.

Pour l'équipe de G.T.S., spécialisée dans les travaux d'accès difficiles, cela a été une véritable aventure humaine riche en adaptations et innovations tant dans les procédés que dans les matériaux et les outils. □

CHIFFRES-CLÉS

- Moyens humains : équipe de 4 à 10 personnes composée de cordistes polyvalents, d'un tuyauteur, d'un soudeur, de canaliseurs, de maçons et d'un cuisinier
- Base vie : dans la maison de la Shem en haut de la conduite
- Conduite Forcée changée : 110 m de longueur dont 95 m dans la partie à 45° ; diamètre 800 mm
- 365 marches pour gravir la pente à 45°
- 12 mois de chantier
- 2 500 mn d'hélicoptère (332 rotations)
- 30 t de déchets évacués
- 30 t de béton fabriqué et mise en place sur site
- 800 h de déneigement
- 300 h de nettoyage pour la mise en place des supports de conduites
- Un total de 6 530 h de travail, hors désamiantage (environ 1 000 heures)
- Chantier réalisé d'août 2014 à septembre 2015

ENCADRÉ DES PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE / MAÎTRES D'ŒUVRE : SHEM

ENTREPRISE DE TRAVAUX : G.T.S. filiale de Nge (mandataire)

ENTREPRISES SOUS-TRAITANTES : Bert (Bureau d'études pour le dimensionnement des ouvrages et des moyens de levage), Louit Environnement (travaux de dépose en sous-section 3), Pyrem Contrôles (contrôles du monorail et de l'ascenseur incliné), Snpc (peintures)

ABSTRACT

REPLACEMENT OF THE DISCHARGE PIPE FOR PUMPING IN ARTOUSTE LAKE

LAURENT VIGUIER, G.T.S. - BERTRAND DELATTRE, G.T.S.

Replacement of the Artouste pressure pipe was a highly technical operation carried out in extreme conditions, underground, in high mountain country and in winter. As part of the modernisation of its facilities in Ossau Valley, Société Hydro-Électrique du Midi awarded a contract to G.T.S., a specialist in geotechnical works to enhance safety in hard-to-access locations. In response to the project's complexity, the latter proposed a multi-technique solution. Various skilled workers and major material resources were deployed from the construction camp set up at an altitude of 2 000 m, to perform rope-harnessed work (45° gradient), asbestos removal, and provide expertise regarding ski lifts, electronics, etc. □

SUSTITUCIÓN DEL CONDUCTO DE DESCARGA DE BOMBEO DEL LAGO DE ARTOUSTE (DEPARTAMENTO FRANCÉS DE PIRINEOS ATLÁNTICOS)

LAURENT VIGUIER, G.T.S. - BERTRAND DELATTRE, G.T.S.

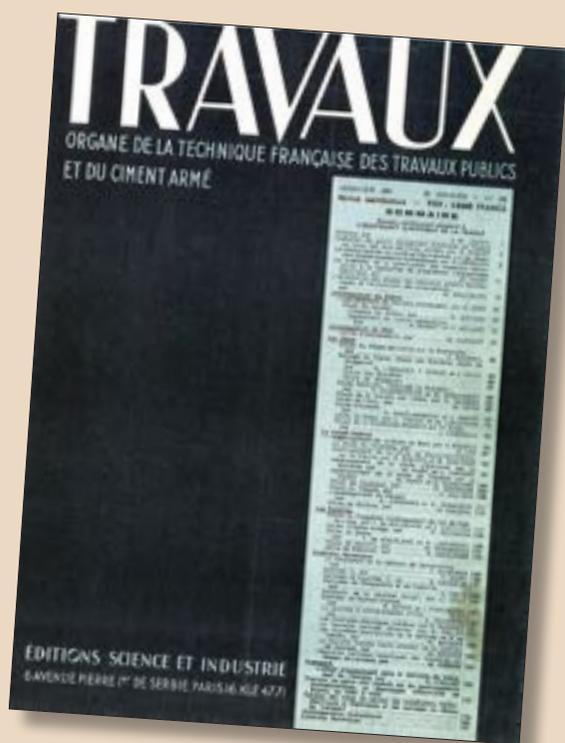
La sustitución del conducto forzado de Artouste ha sido una operación muy técnica realizada en condiciones extremas, bajo el nivel del suelo, en alta montaña y en invierno. En el marco de la modernización de sus instalaciones del valle de Ossau, Société Hydro-Électrique du Midi encargó este proyecto a G.T.S., especialista en obras geotécnicas de protección en accesos difíciles. En respuesta a la complejidad del proyecto, G.T.S. propuso una solución multitécnica. Así, se movilizaron distintas competencias e importantes medios materiales para la instalación del campamento base a 2.000 m de altitud, los trabajos verticales (pendiente de 45°), la intervención en la subsección 3, el remonte mecánico y la electrónica, etc. □

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : CHUTE ISÈRE-ARC - CENTRALE DE RANDENS

P. CHAPOUTIER, DIRECTEUR DE LA RÉGION HYDRAULIQUE ALPES II -
M. KOBILINSKI, CHEF DE L'AMÉNAGEMENT ISÈRE-ARC

TRAVAUX N°195 - JANVIER 1951

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR PAUL-HENRI GUILLOT, DOCUMENTALISTE-ARCHIVISTE, Fntp



La « Houille Blanche » est apparue sous ce nom en 1878, par antiphrase avec la « houille noire », le charbon, source d'énergie de l'industrie à l'aube des temps modernes. Les écologistes étaient encore dans les limbes.

La Houille Blanche a pour père fondateur Aristide Bergès (1833-1906), ce papetier originaire de l'Ariège, diplômé de l'École Centrale des Arts et Manufactures, qui installa une usine de déchetage du bois à Lancey, en Isère, dont l'énergie était fournie par l'eau du massif de Belledonne amenée par une conduite forcée.

Dans l'immédiat après-guerre, les aménagements hydroélectriques connaissent encore un grand développement, en France et dans son empire colonial, en Europe, et notamment dans les Alpes. Le barrage de Tignes sur l'Isère est inauguré en 1953 par le président Vincent Auriol. C'est, à l'époque, avec ses 181 m de hauteur, le plus haut bar-

rage-voûte d'Europe. Il reste aujourd'hui le plus haut de France.

La valeur des apports hydrauliques de l'Isère, 100 m³/s, considérablement renforcée par le barrage de Tignes à l'amont, conduit Électricité de France à exploiter une dénivellée de 150 m entre l'Isère et son affluent l'Arc, entre Aigueblanche et Randens. Les travaux sont réalisés simultanément à ceux du barrage.

L'aménagement comprend un barrage de 21 m et une retenue de 400 000 m³ sur l'Isère à Aigueblanche, au lieu-dit Les Échelles d'Annibal, une prise d'eau avec dessableurs, une galerie souterraine de 16,2 km de long en section 32 m² dans le massif cristallin du mont Bellachat, une cheminée d'équilibre non déversante à étranglement de 15 000 m³ à l'aval, deux puits de conduite forcée, une centrale électrique à Randens comportant 4 groupes Francis de 35 000 kVA, et enfin un canal de fuite.

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: CHUTE ISÈRE-ARC - RANDENS POWER STATION TRAVAUX N°195 - JANUARY 1951

P. CHAPOUTIER, HEAD OF THE ALPES II HYDRAULIC REGION
M. KOBILINSKI, HEAD OF ISÈRE-ARC DEVELOPMENT

The name "White Coal" appeared in France in 1878, in contrast with the "black coal" that was the source of energy for industry at the dawn of the modern era. Ecologists were still in limbo. The founding father of White Coal was Aristide Bergès (1833-1906), a paper manufacturer from the Ariège region, graduate of the Ecole Centrale des Arts et Manufactures, who set up a wood shredding factory at Lancey, in the Isère region, with energy provided by water from the Belledonne mountains, brought down by pressure pipe. In the immediate post-war period, hydropower projects were still undergoing significant development, in France and its colonial empire, in Europe, and especially in the Alps. The Tignes dam on the Isère was inaugurated in 1953 by President Vincent Auriol. At the time, with its 181-metre height, it was the tallest arch dam in Europe. It is still today the tallest dam in France. The water delivery of the Isère, 100 m³/s, considerably increased by the Tignes dam upstream, led Electricité de France to exploit a difference in altitude of 150 metres between the Isère and its tributary the Arc, between Aigueblanche and Randens. The works were carried out at the same time as work on the dam. The project comprised a 21-metre dam and a 400,000 m³ reservoir on the Isère at Aigueblanche, in the Echelles d'Annibal locality, a water intake with grit chambers, an underground gallery 16.2 km long and of cross section 32 m² in the crystalline mass of Mount Bellachat, a 15,000 m³ restricted-orifice surge tank downstream, two pressure pipe shafts, an electric power station at Randens containing four Francis generators of 35,000 kVA capacity and, finally, an outlet channel. □

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: CASCADA ISÈRE-ARC - CENTRAL DE RANDENS TRAVAUX N°195 - ENERO DE 1951

P. CHAPOUTIER, DIRECTOR DE LA REGIÓN HIDRÁULICA ALPES II
M. KOBILINSKI, JEFE DE LA INSTALACIÓN ISÈRE-ARC

El término "hulla blanca" se acuñó en 1878, en contraposición a la "hulla negra", el carbón, fuente de energía de la industria al alba de los tiempos modernos. El ecologismo estaba todavía en el limbo. El padre fundador de la hulla blanca fue Aristide Bergès (1833-1906), un fabricante de papel originario de Ariège, titulado por la Escuela Central de Artes y Manufacturas, que instaló una fábrica de triturado de madera en Lancey, en el departamento francés de Isère, que utilizaba como energía el agua del macizo de Belledonne, encaminada mediante un conducto forzado. A comienzos de la posguerra, las instalaciones hidroeléctricas todavía experimentaban un gran desarrollo en Francia y en su imperio colonial, así como en Europa, y en especial en los Alpes. La presa de Tignes sobre el río Isère fue inaugurada en 1953 por el presidente Vincent Auriol. En aquella época, con 181 m de altura, era la mayor presa bóveda de Europa. Actualmente sigue siendo la más alta de Francia. El potente caudal hidráulico del Isère, de 100 m³/s, considerablemente reforzado por la presa de Tignes aguas arriba, llevó a Electricité de France a realizar un desnivel de 150 m entre el Isère y su afluente el Arc, entre Aigueblanche y Randens. Las obras se realizaron simultáneamente a las de la presa. La instalación consta de una presa de 21 m y un embalse de 400.000 m³ sobre el Isère en Aigueblanche, en la localidad de Les Echelles d'Annibal, una toma de agua con desarenador, una galería subterránea de 16,2 km de longitud con una sección de 32 m² en el macizo cristalino del monte Bellachat, una chimenea de equilibrio no vertiente con estrangulamiento de 15.000 m³ aguas abajo, dos pozos de conducto forzado, una central eléctrica en Randens, formada por 4 grupos Francis de 35.000 kVA, y finalmente un canal de desagüe. □

Chute Isère-Arc (Centrale de Randens)

Par

P. CHAPOUTHIER

et

M. KOBILINSKY

Directeur de la Région d'Équipement Hydraulique Alpes II.

Chef de l'Aménagement Isère-Arc.

ENTRE Moutiers et son confluent avec l'Arc, l'Isère décrit une boucle longue de 45 km dont le sommet est à Albertville. Aucune installation hydroélectrique n'avait été aménagée jusqu'à maintenant sur ce parcours dont la pente moyenne n'est que de 4 p. 1 000 pour un débit moyen naturel de l'Isère à Moutiers de 50 m³ : s. Mais la mise en chantier du barrage de Tignes en 1946 et la réalisation probable de la retenue de Champagny, destinée à régulariser le bassin versant du Doron de Bozel, sont appelées à augmenter considérablement la valeur des apports de l'Isère, dont le débit en heures de pointe d'hiver atteindra 100 m³ : s à Moutiers.

Pour utiliser ces eaux sans donner aux ouvrages d'aménagé un développement prohibitif, eu égard à la hauteur de chute obtenue, Electricité de France décida de mettre à profit la dénivellation existant entre les vallées de l'Isère et de l'Arc à l'endroit où la distance qui les sépare est la plus petite; le

changement de versant implique la réalisation d'un tunnel de grande section traversant sur une longueur de 11 700 m entre fenêtres le massif du mont Bellachat (2 484 m) à près de 2 000 m sous sa crête. Cet ouvrage, pièce maîtresse de l'aménagement Isère-Arc, se présente, sous réserve des difficultés propres aux souterrains à grande profondeur, dans des conditions favorables car il se situe entièrement dans la bande homogène de terrains cristallins qui, du Belledonne au Mont-Blanc, offre aux travaux de percement les conditions apparemment les plus propices qu'on puisse trouver dans les Alpes françaises.

Caractéristiques de l'aménagement.

Les caractéristiques principales de l'aménagement, qui captera les eaux de l'Isère à Moutiers après son confluent

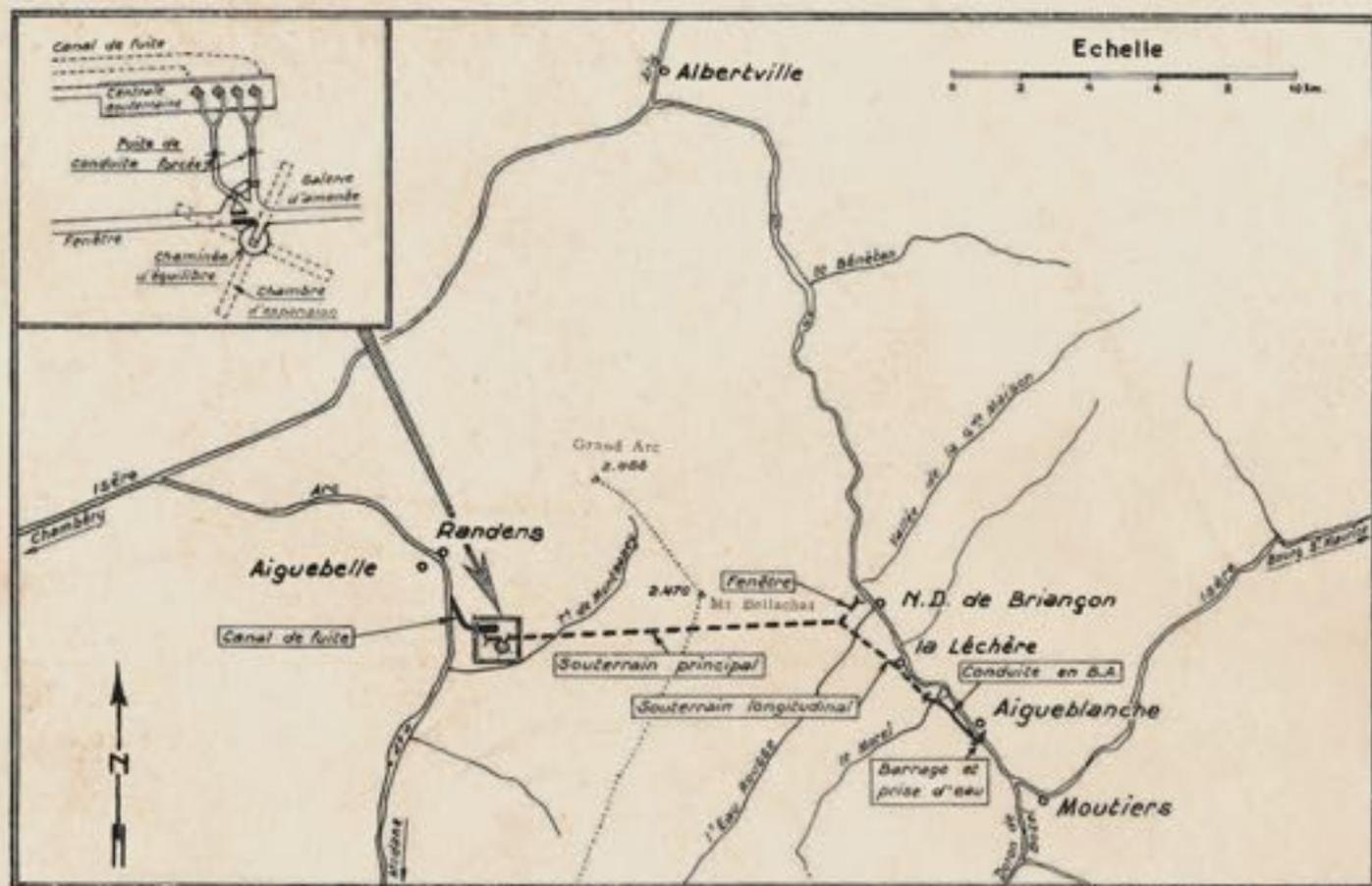


Fig. 1. — Plan de l'aménagement.

avec le Doron de Bozel, et qui les restituera dans l'Arc à Randens, sont :

- Bassin versant : 1 575 km².
- Débit dérivé : 100 m³/s.
- Cote amont maxima (imposée par Moutiers) : 471.
- Hauteur de chute brute maxima : 153 m.
- Puissance installée : 140 000 kVA.
- Productibilité annuelle moyenne : 450 M kWh.
- Chacune des retenues de Tignes et de Champagny représentera pour la chute une réserve d'environ 75 M kWh.

Consistance des ouvrages.

La chute comprendra les ouvrages suivants :

Un barrage de 21 m de haut créant une retenue de 400 000 m³ utiles.

Une prise d'eau encastrée dans le rocher de la rive gauche et deux dessableurs en charge, type Dufour, installés dans des alignements droits de la canalisation d'aménée.

Des canalisations d'aménée en charge de 32 m³ de section nette et d'une longueur totale de 16 200 m se décomposant en :

- Une conduite circulaire en béton armé de 6,40 m de diamètre posée à flanc de coteau. Longueur : 2 500 m ;
- Une galerie parallèle à l'Isère. Longueur : 3 000 m ;
- La galerie transversale sous le Mont Bellachat, dite « Souterrain principal ». Longueur : 10 700 m ;
- Une fenêtre de 1 000 m de long relie la plate-forme d'attaque de Notre-Dame de Briançon à la jonction des deux galeries. Ces dernières seront entièrement revêtues.

Une cheminée d'équilibre non déversante à étranglement (capacité 15 000 m³).

Deux puits de conduite forcée verticaux de 3,70 m de diamètre.

Une centrale souterraine comportant 4 groupes verticaux à turbines Francis de 35 000 kVA et de deux ensembles de 3 transformateurs monophasés 10 000 V/150 000 V de 24 000 kVA chacun.

Un canal de fuite de 1 250 m de longueur.

Un poste et des bâtiments d'exploitation extérieurs.

Les travaux de génie civil à exécuter sont caractérisés par l'importance des terrassements souterrains dont le volume atteint 730 000 m³.

Souterrain principal.

Les délais de mise en service de l'aménagement sont conditionnés par le percement du souterrain principal. C'est donc sur l'exécution de cet ouvrage que les principaux efforts ont porté jusqu'ici.

Choix et description des méthodes d'exécution.

Le souterrain a une section brute de 41 m², en forme de fer à cheval. 6 km ou plus devront être perforés à partir de chaque tête et l'attaque amont sera descendante à partir de l'extrémité de la fenêtre, en raison de la pente unique d'ailleurs faible (1,3 p. 1 000) adoptée pour des raisons hydrauliques. La température du rocher atteindra 37° et dépassera 35° sur 2 km, selon une évaluation théorique de M. le Professeur Andraea, spécialiste suisse des tunnels transalpins. La réalisation du souterrain Isère-Arc pose donc les mêmes problèmes que

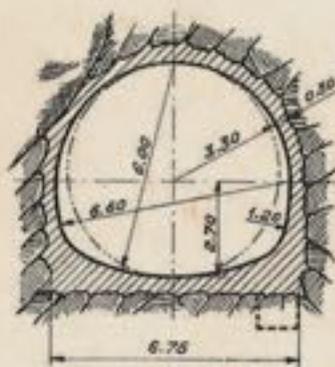


Fig. 2. Section-type du souterrain principal.

dans les souterrains ferroviaires dont le profil en long comporte généralement un dos d'âne au milieu et des pentes relativement fortes.

Afin de résoudre les problèmes de ventilation et d'épuisement des eaux qui se posent surtout pour l'attaque amont, l'exécution d'une galerie parallèle ascendante, reliée par de petites galeries transversales à l'attaque amont du souterrain principal, a été envisagée. En raison du coût élevé de l'assurance qui aurait ainsi été prise pour le cas où des difficultés insurmontables seraient rencontrées, cette solution n'a pas été retenue.

La ventilation est assurée à chaque tête par deux ventilateurs de 180 ch et par une tuyauterie de 1 m de diamètre, permettant de refouler ou d'aspirer un débit d'air de 12 m³/s à 6 km.

Pour l'évacuation des eaux d'infiltration éventuelles une rigole revêtue de 0,8 m² est exécutée systématiquement à l'attaque aval, et des moyens de pompage puissants permettant d'évacuer jusqu'à 500 l/s sont approvisionnés à l'attaque amont.

Les tunnels transalpins ont été percés jusqu'ici suivant les méthodes classiques de la galerie d'avancement suivie de chantiers d'abattages. Le souterrain Isère-Arc par contre est exécuté, dans la mesure où le terrain le permet, à pleine section, ce qui rend notamment possible la mise en oeuvre d'un matériel puissant pour l'extraction des déblais.

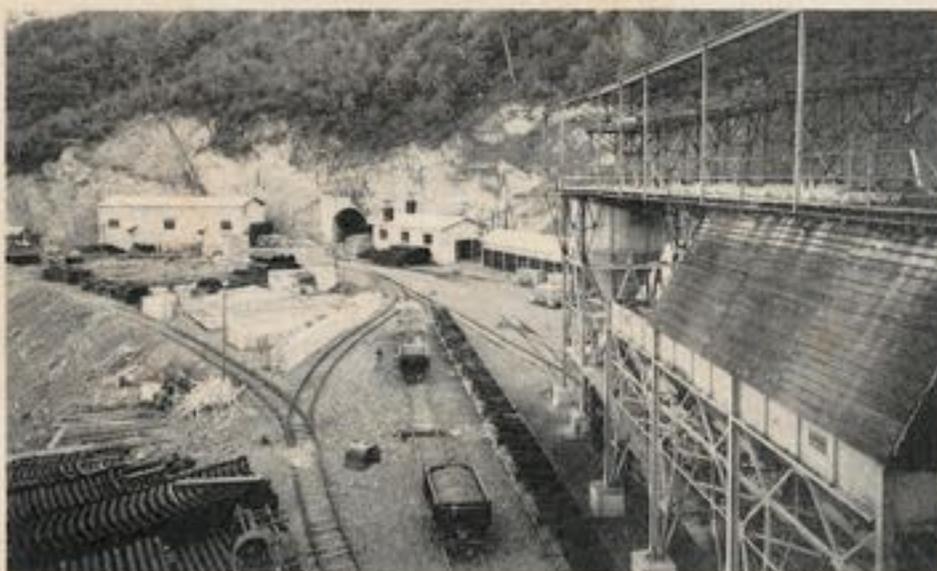


Fig. 3. — Plate-forme d'attaque de Randens.

[Photo Bergeret.]



Fig. 4. — Jumbo replié et wagon atelier.

(Photo Talraz.)

L'intérêt de cette méthode réside non seulement dans les avancements peut-être légèrement supérieurs qu'elle permet d'obtenir, mais surtout dans la possibilité de réaliser les travaux avec une main-d'œuvre réduite, fournissant un effort physique moindre dans des conditions de travail meilleures.

La perforation est effectuée à partir d'une plate-forme-jumbo à deux étages, roulant sur voie de 4 m, avec 16 marteaux légers sur pousoirs et des fleurets Coromant. Les volées sont de 3 m. Le schéma de tir comprend 75 trous avec un bouchon en éventail. Tir électrique avec 10 retards.

Les déblais sont chargés avec une pelle électrique Conway 75 dans des wagons basculants Austin-Western de 4 m³ munis d'attelages automatiques. Les trains de wagons sont remorqués par des locotracteurs électriques de 10 tonnes à batterie et trolley, qui marchent sur trolley dans la partie revêtue de la galerie et sur batterie à l'avancement.

Tout le matériel roulant est à voie métrique. 4 files de rail de 30 kg posées à intervalles de 1 m forment à volonté, suivant la disposition des aiguillages, deux voies latérales ou une

voie centrale qui est utilisée pour faire passer les trains sous le jumbo lorsqu'il est replié.

La pelle travaille alternativement sur la voie de gauche et sur la voie de droite et l'échange des wagons vides par les wagons pleins se fait au moyen d'un saute-rails.

Un câble armé 15 000 V alimente les transformateurs et les stations redresseuses qui fournissent le courant aux pelles Conway et aux locotracteurs.

Chacun des trois postes de l'avancement comprend de 25 à 30 hommes. Un poste de jour à effectif équivalent assure l'entretien de la voie et du matériel, effectue les réparations et les travaux divers.

L'utilisation de la méthode d'attaque à pleine section et la mise en œuvre du matériel décrit ont permis d'obtenir à l'attaque aval des avancements moyens hebdomadaires de 9 m par jour, correspondant approximativement à la réalisation d'une volée de 3 m en 8 h avec la décomposition suivante :

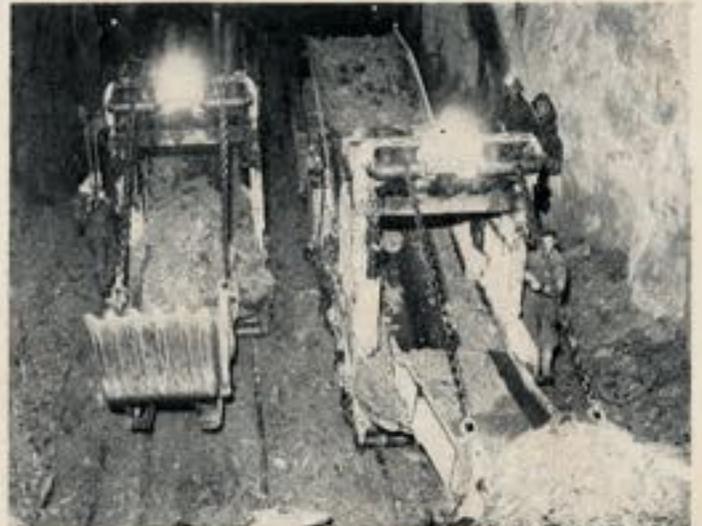


Fig. 5. — Essai de marouflage avec utilisation simultanée de 2 pelles Conway 75.

(Photo Capellard.)



Fig. 6. — Fenêtre de Notre-Dame de Briançon.

(Photo Talraz.)

Perforation, chargement et tir	2 h 40 mn
Ventilation	20 mn
Chargement des déblais	4 h
Pose du coupon de voie et mise en place du jumbo	30 mn
Incidents divers	30 mn

La pelle Conway 75 utilisée avec le matériel indiqué ci-dessus a un rendement de pointe de 80 m³ : h et un rendement moyen de 50 m³ : h.

L'avancement journalier moyen de 9 m pourra être dépassé grâce à l'utilisation simultanée à l'avancement de deux pelles Conway 75 travaillant côte à côte. Cette nouvelle méthode de chargement des déblais qui a été mise en œuvre au mois de septembre 1950 à l'attaque amont a déjà permis de dépasser l'avancement moyen hebdomadaire de 9 m par jour et elle devrait conduire, une fois mise au point, à des avancements moyens journaliers compris entre 10 et 12 m.

Le revêtement des piédroits et de la voûte de la galerie suivra en principe l'avancement à une distance de 500 à 1 000 m. Le béton sera

fabriqué en galerie et mis en place derrière des coffrages télescopiques au moyen d'un canon à béton « Press-weld ».

Le revêtement du radier sera effectué après la percée, en repliant le matériel.

Avancement des travaux.

Les travaux préparatoires commencés au milieu de 1947 se sont trouvés retardés pour des raisons financières. Ils comportaient : la construction à Notre-Dame de Briançon et à Randens de cités permettant de loger en tout 700 célibataires et 80 ménages, l'aménagement des deux plates-formes d'attaque et de 2 800 m de routes d'accès (total des terrassements exécutés : 100 000 m³), enfin l'installation des différents bâtiments de chantier.

Les travaux de percement ont commencé en juin 1949. A la fin d'avril 1950 la fenêtre de Notre-Dame de Briançon (longueur 1 000 m, section 22 m²), dont l'exécution avait été gênée par des venues d'eau, était achevée et 1 500 m du souterrain principal étaient percés à l'attaque aval dans un rocher excellent.

A la fin septembre 1950, l'attaque amont était à 750 m de l'extrémité de la fenêtre et avançait d'une manière satisfaisante dans un terrain très favorable. Par contre l'attaque aval n'avait atteint que le P. K. 2,045, en raison du schiste délit rencontré à partir du P. K. 1,900 et de la nécessité de procéder au soutènement à l'avancement en bétonnant certains anneaux immédiatement après le dérochement.

Les travaux de bétonnage pour le revêtement de la voûte et des piédroits ont commencé au début d'octobre 1950, à l'attaque aval, où le montage des installations est terminé, et à l'attaque amont à la fin de l'année écoulée.

Si aucune difficulté géologique grave n'est rencontrée, on peut espérer que le tunnel sera percé en fin 1952 et la chute mise en service en fin 1953.

Autres ouvrages.

Les autres ouvrages de l'aménagement n'ont fait l'objet jusqu'à présent que de travaux de reconnaissance. Les travaux définitifs commenceront au début de cette année.

Barrage des Echelles d'Annibal.

Le barrage sera situé à l'extrémité aval des gorges de Pont-Séran où le lit de l'Isère se resserre entre deux éperons rocheux. Les sondages effectués (voir coupe ci-contre) ont montré l'existence d'un sillon alluvionnaire étroit mais profond descendant à 70 m au-dessous du lit de l'Isère. La construction du barrage pose donc un problème de fondations qu'on résoudra en appuyant l'ouvrage sur le rocher des rives par l'intermédiaire d'une voûte à axe horizontal. Les mesures de perméabilité des alluvions ont montré qu'il n'était pas nécessaire d'étancher le sillon sur toute sa profondeur à condition de prévoir une ligne de percolation adéquate.

L'étude sur modèle réduit des possibilités d'évacuation des apports solides charriés par l'Isère a montré la nécessité de prévoir des vannes de fond importantes permettant d'effectuer des chasses en rétablissant la ligne d'eau naturelle de la rivière. Aussi a-t-on adopté pour l'ouvrage les caractéristiques suivantes inspirées de celles du barrage du Verbois : barrage du type poids avec 2 pertuis de 10 m de large séparés par une pile centrale ; chaque pertuis comporte à sa partie inférieure une vanne de fond du type secteur, à sa partie supérieure une vanne de surface, et entre les deux un masque en béton armé à l'intérieur duquel se trouvent les principaux organes de commande des vannes.

Pour la réalisation du barrage, l'Isère sera dérivée par un souterrain situé sur la rive droite et qui sera conservé comme évacuateur de crues de manière à permettre le passage de la crue millénaire de l'Isère, évaluée à 1 400 m³ : s.

Conduite en béton armé.

Cet ouvrage traverse les cônes de déjections des torrents du Nant Noir et du Morel qui forment la plaine d'Aigueblanche. Une conduite d'importance analogue a déjà été réalisée il y a une vingtaine d'années pour l'aménagement de Drac-Romanche.

Galerie parallèle à l'Isère.

Entre les terrains liasiques, sur lesquels passe la conduite en béton armé, et le massif cristallin du Mont Bellachat se

trouve une bande de trias d'une centaine de mètres d'épaisseur qui donne naissance aux eaux thermales de La Léchère. Afin de ne pas faire peser sur le percement du souterrain principal les aléas d'une traversée de trias, la galerie d'amenée reste parallèle à l'Isère jusqu'à son entrée dans le cristallin. La bande de trias a été reconnue par une galerie située derrière l'établissement thermal de La Léchère. On y a rencontré des bancs de gypse avec une grotte naturelle d'environ 500 m³, et des cargneules décomposées. Les travaux de reconnaissance se poursuivent et différentes solutions pour le passage des canalisations d'amenée dans cette zone particulièrement délicate sont à l'étude.

Cheminée d'équilibre et puits de conduite forcée.

La cheminée d'équilibre qui aura à compenser l'inertie d'une masse d'eau de près de 500 000 m³ est un ouvrage d'une importance exceptionnelle. Elle sera constituée par un puits de 15,50 m de diamètre, haut de 50 m, et par 5 galeries horizontales étagées formant épanouissement à la partie supérieure de ce puits.

Les deux puits de conduite forcée seront chemisés de tôle d'acier. Une vanne papillon sera installée en tête de chacun d'eux.

Centrale souterraine.

Des sondages ont montré l'impossibilité de fonder une centrale extérieure sur le rocher. Il a paru préférable de construire une centrale souterraine dans une roche dont l'excellente qualité a été mise en évidence par une galerie de reconnaissance, plutôt que de fonder une centrale extérieure sur les

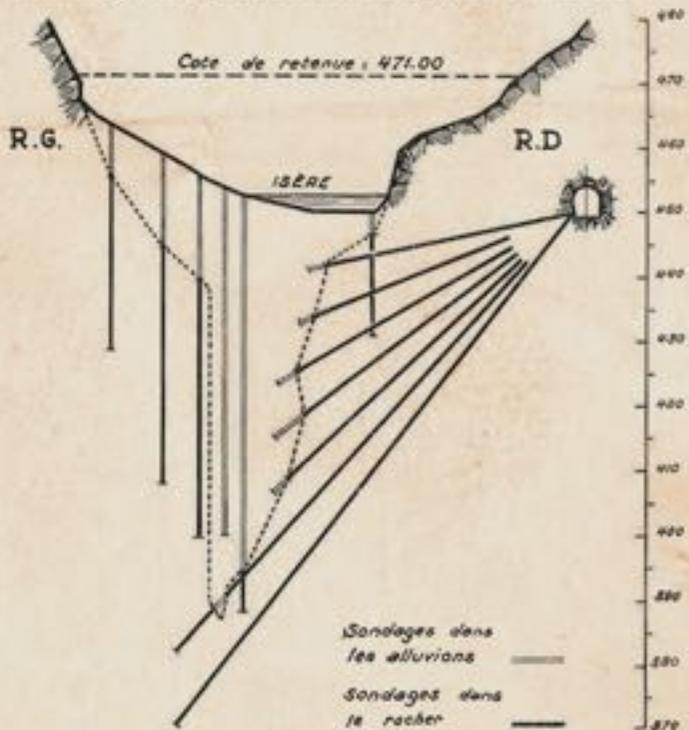


Fig. 7. — Profil du sillon alluvionnaire à l'emplacement du barrage.

alluvions de la vallée de l'Arc dans une nappe phréatique particulièrement gênante pour les travaux. La solution adoptée a d'ailleurs un prix de revient équivalent à celui de la solution extérieure et ses aléas semblent moindres.

Les robinets d'arrêt des turbines se trouveront dans la salle des machines. Les transformateurs seront placés en souterrain le long de la galerie d'accès à l'usine.

Canal de fuite.

Après un parcours de 250 m dans le rocher, le canal de fuite traverse la plaine de Randens à l'air libre sur une longueur d'environ 1 000 m, son plafond étant à 10 m au-dessous du niveau du sol. Les déblais seront utilisés comme agrégats pour la fabrication de tous les bétons de la tête aval.

P. CHAMPTHIER et M. KOBILINSKY.

Lundi, 7h00, mon véhicule ne démarre plus.

- Mon chantier attendra.
- J'emprunte la voiture de ma femme.
- Je reste serein : mon assureur SMABTP a tout prévu !



Franck, conseiller en assurance SMABTP

« Quand un problème arrive à l'un de nos clients, ce n'est jamais celui qu'il imaginait ! Heureusement notre savoir-faire nous permet d'anticiper pour lui : nous avons déjà tout envisagé. C'est pour cela que nous apportons à nos assurés la meilleure solution pour l'entreprise, leurs dirigeants et leurs collaborateurs. »

Fort de plus de 150 ans d'expérience, SMABTP assure les professionnels du BTP. Ses experts vous accompagnent à chaque instant.

Par exemple, en cas de sinistre auto, vos collaborateurs et vous-même bénéficiez d'une **assistance performante et complète**, avec la fourniture d'un véhicule de remplacement et l'expertise à distance. Tout ce dont vous avez besoin pour protéger votre activité !

Notre métier : assurer le vôtre

Retrouvez-nous sur
www.groupe-sma.fr

ACTIVITÉ Responsabilité décennale - Responsabilité civile
Dommages en cours de travaux - Protection juridique

BIENS PROFESSIONNELS Engins de chantier - Locaux - Véhicules

DIRIGEANTS ET SALARIÉS Couverture des engagements sociaux - Épargne
Prévoyance - Retraite collective et individuelle


SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMABTP, société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics,
société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances -
RCS PARIS 775 684 764 - 114 avenue Emile Zola - 75739 PARIS Cedex 15