

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

ENERGIE. MATS EN BETON DE LA FERME EOLIENNE DE TRAIRI AU BRESIL. TOUR SOLAIRE D'ASHALIM EN ISRAEL. LUCIOLE® : ECLAIRAGE INTELLIGENT. AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE DE NAM NGUM 3 AU LAOS. EXPERIMENTATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE POUR AMELIORER LE BILAN ENERGETIQUE D'UN BATIMENT EXISTANT. LES EOLIENNES OFFSHORE. TRESORS DE NOS ARCHIVES : AMENAGEMENT DE LA BIA EN COTE D'IVOIRE - EQUIPEMENT DE LA CHUTE D'AYAME II

N°943 JUILLET / AOÛT 2018



LES ÉOLIENNES
OFFSHORE
© GE0SEA

**LES TRAVAUX
PUBLICS**
FÉDÉRATION
NATIONALE



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP



www.btp-banque.fr

© 2014 BTP Banque. Tous droits réservés. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la BTP Banque est formellement interdite. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la BTP Banque est formellement interdite.

Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fnfp.fr**Comité de rédaction**
Pierre Aristaghes (Bouygues tp), Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard Detry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Florent Imbert (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)**Ont collaboré à ce numéro**
Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Edouard 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**Directeur de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée**
Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).

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

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

LE « GRAND CARÉNAGE » : PROJET INDUSTRIEL MAJEUR DU GROUPE EDF ET SOCLE DE LA FILIÈRE INDUSTRIELLE NUCLÉAIRE



© DR

EDF est engagé fortement dans la lutte contre le changement climatique. L'objectif d'EDF, tel que défini dans son projet CAP 2030, est d'être demain le leader énergétique bas carbone de référence. En s'appuyant déjà sur son mix électrique très fortement décarboné, mais qui pèse encore trop peu dans le mix énergétique français (25 % en 2015).

Nous sommes convaincus que la complémentarité nucléaire et énergies renouvelables est aujourd'hui un levier essentiel de cette transition énergétique et que la solution la plus économique pour préparer ce mix-énergétique est de poursuivre l'exploitation de notre parc nucléaire existant après quarante ans.

Afin de continuer à exploiter en toute sûreté notre parc nucléaire, nous avons engagé un programme d'investissements majeur appelé le « Grand Carénage ». Il mobilise toute la filière industrielle nucléaire française.

L'exploitation des réacteurs après quarante ans est aujourd'hui une réalité à l'international. En Europe, plusieurs réacteurs ont dépassé quarante ans : Beznau 1 et 2 (1969 et 1971) en Suisse et Oskarshamn 1 (1972) en Suède, mais aussi Tihange 1 en Belgique. Aux États-Unis, à ce jour, soixante-et-onze réacteurs ont obtenu une prolongation de licence à soixante ans (sur cent en exploitation), moyennant des investissements significatifs en termes de changement de gros composants et de rénovation, mais sans modification de la conception des réacteurs en exploitation. En France, il n'existe pas de limite à la durée de fonctionnement des centrales, mais des

autorisations de fonctionner par palier de dix ans, délivrées par l'Autorité de sûreté nucléaire, entre deux réexamens décennaux.

Le « Grand Carénage » représente 45,6 Mds€ d'investissement sur la période 2014-2025. Il nous permet d'investir tant dans la rénovation ou le remplacement d'équipements que dans l'amélioration du niveau de sûreté des réacteurs à l'occasion des quatrièmes visites décennales, renforcée par le retour d'expérience de Fukushima. Aujourd'hui, tous les chantiers de construction de diesels d'ultime secours sont en cours et le remplacement des gros composants a déjà commencé : 28 réacteurs ont déjà fait l'objet d'un remplacement de leurs générateurs de vapeur, 45 stators d'alternateurs ont été rénovés sur les 49 prévus et 116 pôles de transformateurs principaux sur 173 ont été remplacés.

Le « Grand Carénage » c'est près d'1 milliard d'€ qui s'ajoute aux 3 milliards investis chaque année sur le parc. Même avec cet engagement financier très important, nous pouvons, dans nos centrales, maintenir ce qu'on appelle le « coût restant à engager » de l'ordre de 32 euros/MWh. Aucun autre moyen de production d'énergie n'est davantage compétitif.

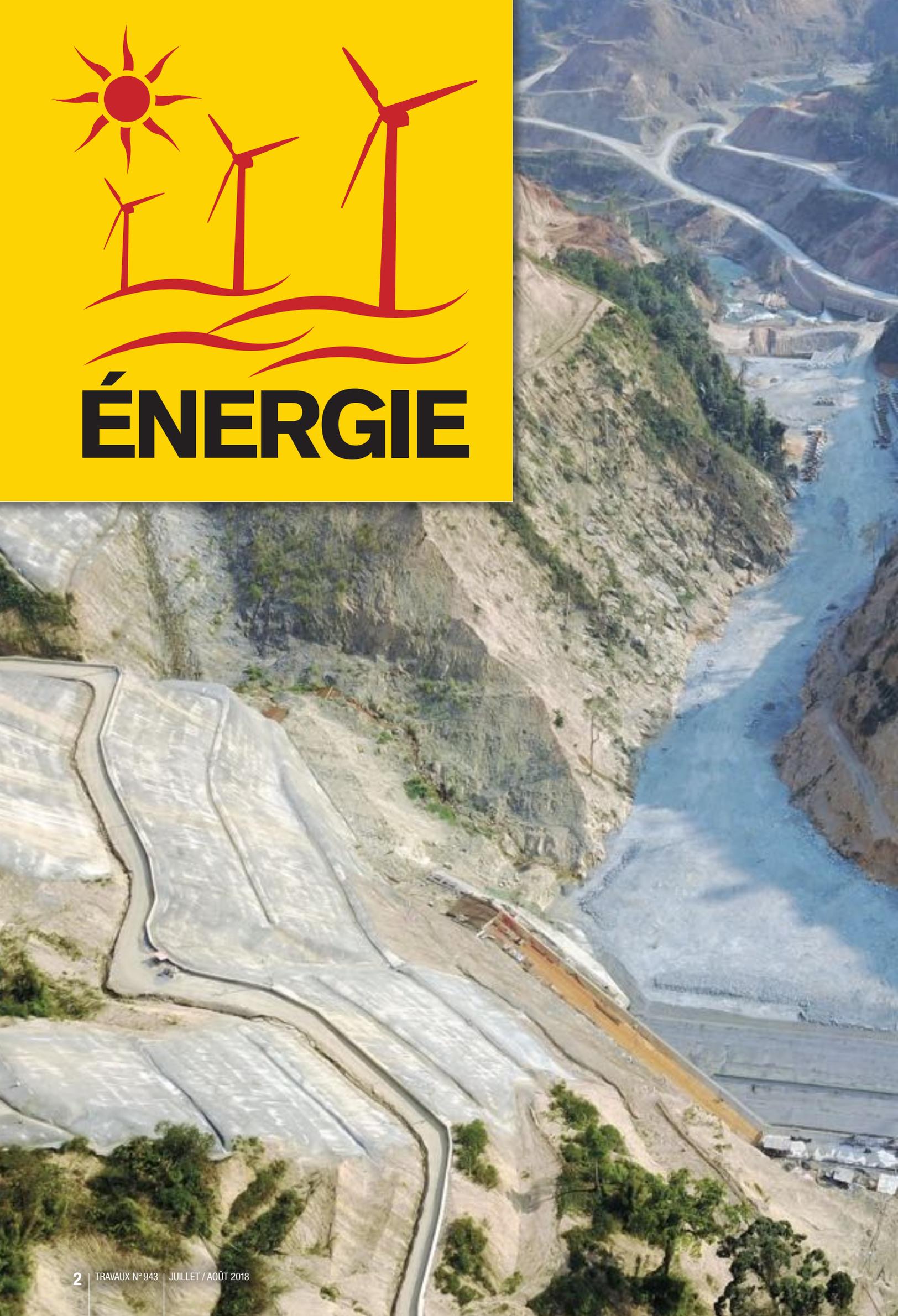
En France, avec cette politique d'investissement forte, EDF est le premier donneur d'ordre de l'industrie. Grâce à cela, la filière nucléaire, 3^e filière industrielle française derrière l'aéronautique et l'automobile, regroupe 220 000 professionnels qui travaillent au sein de 2 600 entreprises, de toute taille, et plus de 116 000 emplois bénéficient de la production nucléaire dans les régions.

Les industriels qui travaillent pour EDF, et plus particulièrement pour le « Grand Carénage », sont fortement impliqués, notamment dans les phases de conception et de préparation des activités. Les équipes d'EDF travaillent main dans la main avec les entreprises concernées. Le « Grand Carénage » est ainsi placé sous le signe de l'adhésion et de la coopération. C'est la condition de la réussite de ce programme industriel majeur.

DOMINIQUE MINIÈRE
DIRECTEUR EXÉCUTIF DU GROUPE EDF, EN CHARGE
DE LA DIRECTION DU PARC NUCLÉAIRE ET THERMIQUE



ÉNERGIE



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



14

ENTRETIEN AVEC ANNE-MARIE CHOCHO

SETEC : L'INGÉNIERIE, ACTEUR DÉCISIF DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

20 CATHIE ASSOCIATES : DE LA MER A LA TERRE - TOUTES LES FACETTES DE LA GÉOTECHNIQUE



28

MÂTS EN BÉTON DE LA FERME ÉOLIENNE DE TRAIRI

au Brésil



36

LA TOUR SOLAIRE D'ASHALIM

en Israël



46

L'ÉCLAIRAGE INTELLIGENT « AU JUSTE BESOIN »

Luciole®



50

AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE NAM NGUM 3

au Laos



60

EXPÉRIMENTATION D'UNE PILE À COMBUSTIBLE

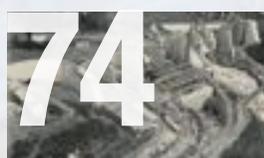
pour améliorer le bilan énergétique d'un bâtiment existant



66

LES ÉOLIENNES OFFSHORE

Développement et thématiques des fondations



74

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : AMÉNAGEMENT DE LA BIA EN CÔTE D'IVOIRE - ÉQUIPEMENT DE LA CHUTE D'AYAMÉ II

Numéro hors série - avril 1964 - 8^e congrès des Grands Barrages

AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE NAM NGUM 3 AU LAOS © ARTELIA



AU BRÉSIL, LES MÂTS EN BÉTON DE 119 m POUR ÉOLIENNE POUSSENT TOUT SEULS GRÂCE À EOLIFT®

FREYSSINET, en partenariat avec l'Ademe, a mis en œuvre un procédé innovant de mât en béton précontraint sur le projet éolien de Trairi au Brésil. Dénommé Eolift®, le procédé permet d'éviter, pour les mâts de très grande hauteur, le recours au levage par grue de forte capacité et s'affranchit des conditions de vent. Il s'est révélé fiable et rapide d'exécution. Par surcroît il présente un bilan carbone réduit par rapport aux mâts en acier. **(Voir article page 28).**



© PHOTO THÈQUE SOLE TRANCHE FREYSSINET / LAURENT CHARTIER

TUBAGE D'UN EXUTOIRE D'ASSAINISSEMENT EN SERVICE

Bordeaux Métropole a fait tuber 500 m d'un collecteur tout en le maintenant en service en cas de pluie.



Le collecteur a été scié en deux pour entrer les tubes. Autour, la boîte en béton se refermait si besoin pendant le chantier.

À Bordeaux (Gironde), une conduite exutoire sur le réseau d'assainissement a été réhabilitée par tubage intérieur. L'impossibilité de faire passer le trop plein d'eaux par une autre voie et la proximité de la Garonne ont déterminé le choix des techniques et le déroulement du chantier.

La pluie de cet hiver a perturbé le déroulement du tubage du tronçon du collecteur Lajaunie depuis la station de pompage Saint-Émilion jusqu'à la Garonne, en rive droite près du pont levant Jacques Chaban-Delmas. La canalisation, visi-

table, traverse la friche Brazza⁽¹⁾ et rejoint le quai. Entre-temps, elle sera passée sous une voie ferrée et sous une route à 4 voies.

La conduite évacue le trop-plein quand la station Saint-Émilion arrive à saturation, une fois que la bêche des eaux usées, pleine, a débordé dans celle des eaux de pluie qui, à son tour, s'est déversée dans un stockage de 5 000 m³, et que lui-même soit rempli. La Garonne étant soumise aux marées, un clapet empêche qu'elle vienne envahir le réseau. Par ailleurs, la nappe affleure.

FORAGE HORIZONTAL

Le tracé du collecteur exutoire Lajaunie sur le réseau d'assainissement de Bordeaux (voir ci-contre) a été modifié. À sa création dans les années 1960, il emprunte un linéaire existant avec un coude au-delà de la route. Désormais, il rejoint tout droit la Garonne, en une cinquantaine de mètres contre plus de 300 auparavant.

La nouvelle section a été creusée depuis les terrains du Port autonome vers le tronçon existant, de l'autre côté de la 4 voies. Le passage de 30 m sous la chaussée a été réalisé à la tarière (Langer Forages Horizontaux). Une première "vis" de 600 mm a foré un passage, agrandi par une de 1 800 mm, complété côté quai par une tranchée ouverte et l'ouvrage de rejet dans la Garonne.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : direction de l'eau de Bordeaux Métropole.

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Cabinet Merlin.

ENTREPRISES : Sade (mandataire et tubage) avec Sogea (génie civil).

En l'absence de conduites qui auraient pu prendre le relai dans le voisinage comme c'est le cas en centre-ville, il fallait que l'exutoire puisse servir en cas de pluie pendant les travaux. L'exploitant, se basant sur les prévisions météorologiques, prévient le chef de chantier.

Les ouvriers ont deux heures pour évacuer. Chaque puits d'accès comporte une boîte en béton créée autour de la conduite dont la moitié supérieure a été sciée pour introduire le tubage. À chaque alerte, les ouvriers referment la boîte par une chape puis la rouvrent. Ces puits constituent de futurs regards en plus des existants.

→ Chariot de poussée

Les tubes jusqu'à 3 m de long ont été descendus dans chaque puits et posés dans l'ancienne conduite. Puis ils ont été poussés dans le collecteur, une fois nettoyé, par un chariot conçu par la Sade, et emboîtés l'un dans l'autre.

→ Absorber l'irrégularité de la paroi

Ils mesurent 1 700 mm de diamètre extérieur afin de se glisser sans problème dans la conduite en béton armée de 2 000 mm. Un coulis vient combler le vide entre deux. Cet écart de diamètre permet d'absorber les irrégularités de la paroi interne. Des plaques de polypropy-

lène avaient été collées au mortier lors d'une première réhabilitation en 1994. Certaines ont résisté à la pression et à la nature des eaux, d'autres non. Des cloques s'étaient formées et, par endroits, s'étaient détachées.

Après diagnostic et une analyse multi critères, a été retenu un tubage en polyester renforcé de fibres de verre pour les 470 m situés entre la station de pompage et le fleuve. Le béton projeté aurait demandé un temps de séchage incompatible avec la remise en service aléatoire, et un nettoyage très strict de la paroi interne avec enlèvement du polypropylène.

→ Tubes en PRV

Les tubes ont un diamètre intérieur de 1 600 mm. Ils résistent à 3 bars de pression externe et à 1,5 bar en interne. Le PRV se compose de huit couches à base de résine, sable et fibres de verre (gamme Hobas d'Amiblu). Ils comportent un cheminement antidérapant.

Le chantier, commencé en septembre 2017, devrait, si la pluie ne refait pas des siennes, s'achever à la fin de l'été. Coût total TTC : 5,4 millions d'euros. ■

⁽¹⁾ La friche Brazza, ancienne zone d'usines chimiques, est destinée à une opération immobilière.



Une tarière de 600 mm puis une de 1 800 mm (photo) ont creusé le passage sous une 4 voies.

UN CANAL SIMULE LES EFFETS DE LA HOULE SUR DES OUVRAGES



© ESITC CAEN

Le batteur du générateur de houle dans la veine d'essais de 40 m.

Un canal à houle de 40 m de long, 2 de haut et 1 de large fonctionne depuis le 1^{er} juin à l'Esitc de Caen (Calvados). Sa profondeur disponible en eau - 1,50 m - en fait un outil exceptionnel.

Il représente des états de la mer à une échelle du 1/10^e au 1/40^e, par exemple une vague de 15 m. Il permet d'expérimenter des solutions de protection contre les submersions marines, de les adapter

et d'en estimer le coût. Il est complémentaire de la modélisation numérique.

Ce canal, vitré, est mis à disposition des élèves ingénieurs en génie civil de l'école, notamment ceux du mastère d'expertise en ouvrages maritimes et portuaires. Mais il servira aussi aux chercheurs et aux bureaux d'études. Ils pourront évaluer la réaction d'ouvrages actuels aux assauts marins. L'Esitc Caen rappelle qu'il ne suffit pas d'ajouter un mètre à une digue pour contrer une élévation d'un mètre du niveau de la mer.

→ Copilotage

Plusieurs partenaires sont impliqués dans le financement et l'exploitation du canal. Le Cerema Eau mer fleuves est copilote. Il y aura accès trois mois par an pour de la formation et y mener les études définies par la Direction générale de la prévention des risques et de celle des infrastructures, des transports et de la mer. La veine d'essais coûte 300 000 euros, bâtiment inclus. Elle est financée par l'État, la région Normandie et l'école d'ingénieurs (maître d'ouvrage) à parts égales. ■

APPRIVOISER LES VOIES RAPIDES

Quatre équipes pluridisciplinaires planchent sur le "devenir des autoroutes, du boulevard périphérique et des voies rapides du Grand Paris". Ainsi l'ont voulu les collectivités du Forum métropolitain du Grand Paris, syndicat mixte d'études créé en 2009 sous le nom de Paris Métropole. Exposition des résultats : mai-août 2019. L'évolution des autoroutes urbaines, voies rapides ou structurantes est l'un des axes du Livre blanc pour des mobilités durables, optimisées et intelligentes à l'horizon 2030, piloté par l'Association des maires d'Île-de-France, Paris, la Métropole du Grand Paris (131 communes) et des collectivités, publié en mars. Les études redéfiniront les autoroutes urbaines avec, à l'esprit, réduire les distances parcourues, les bouchons, la pollution et les accidents, mieux insérer les axes dans le milieu urbain dont éviter les coupures, et valoriser les délaissés qui les bordent, à un coût acceptable. www.forumgrandparis.fr/consultation-internationale

EUROPAN : 1^{re} LIVRAISON DE VILLES PRODUCTIVES

Les lauréats du 14^e Europan ont été connus fin 2017 et ont fait l'objet d'une exposition en mai-juin à Paris pour la partie française du concours européen. Le thème de cette édition était "villes productives"⁽¹⁾.

Rappelons que cette compétition met en relation des professionnels de l'aménagement, de moins de 40 ans, avec des collectivités ayant des projets d'urbanisme. Elle est portée par Europan France et par deux programmes du Plan construction urbanisme architecture, et soutenue par les ministères de la Cohésion des territoires et de la Culture.

Trente-trois équipes ont été retenues pour les onze sites français⁽²⁾.

Les villes suivantes avaient proposé un site d'études : Amiens (Somme), Angers (Maine-et-Loire), Aurillac (Cantal), Bègles (Gironde), Besançon (Doubs), Évreux (Eure), Grigny et Ris-Orangis (Essonne), Guebwiller (Haut-Rhin), Lille (Nord), Pantin (Seine-Saint-Denis) et Toulouse (Haute-Garonne). Les équipes proposent

des méthodes d'approche de l'aménagement et non des projets ficelés.

→ Mélanger habitat et travail

Par villes productives, les organisateurs entendent la réintégration en centre-ville d'activités de fabrication, maintenance et réparation, un volet souvent négligé en régénération urbaine. Cela comprend aussi le rapprochement entre habitat et travail, et leur mélange.

La 15^e édition d'Europan reprend le même thème. Les sites sur lesquels réfléchir seront présentés en octobre. Le concours commence en février prochain. Les résultats sortent fin 2019.

www.europanfrance.org ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* n°923, avril-mai 2016, page 9 et n°909, octobre 2014, page 8.

⁽²⁾ Le catalogue détaillé des projets sélectionnés paraît à la rentrée.



© VILLE DE GUEBWILLER-NSC FLORIVAL

Guebwiller (Haut-Rhin) a choisi Meriem Chabani, architecte urbaniste, Etienne Chobaux, architecte et John Edom, anthropologue, pour aménager ce site de 6 ha.



© MMT

Éviter les coupures routières est un des axes de travail.

30 SITES À DÉVELOPPER

Le 23 mai, a été dévoilée la liste des 30 sites retenus par la 2^e édition d'Inventons la Métropole du Grand Paris (131 communes).

Ces sites seront visités par les candidats qui veulent y proposer des projets de développement innovants. 1^{re} sélection en septembre ; projets lauréats : mai 2019.

www.inventonslametropole.dugrandparis.fr/sites.html

FUSION DE 2 SYNDICATS

Le Syndicat national des entreprises de démolition et le Syndicat des recycleurs du BTP ont fusionné le 1^{er} juin pour devenir le Syndicat des entreprises de déconstruction, dépollution et recyclage (Sedre, 250 membres), rattaché à la Fédération française du bâtiment.

Cette réunion vise à progresser dans les filières de recyclage, dans la valorisation des déchets du BTP et dans la prévention des risques liés à l'amiante, au plomb, etc.

MARSEILLE : UN PORT ENCORE PLUS GRAND

Le Grand port maritime de Marseille va recevoir 50 millions d'euros de la Banque européenne d'investissement qui renouvelle son partenariat. De quoi envisager sereinement de dépenser 136 millions d'euros pour accueillir des navires de croisière toujours plus longs, plus de logistique à Feuillane, et poser les jalons de son projet stratégique 2019-2023.

ÉCO QUARTIER EN GUYANE

Roura, située à 25 km au sud-est de Cayenne (Guyane), se développe mais la proportion de logements disposant du confort a diminué entre 2008 et 2013.

L'Établissement public foncier et d'aménagement (État) a acquis 180 ha sur lequel un éco quartier va être construit. Des logements vont venir densifier le bourg ancien. Un office de la biodiversité amazonienne va voir le jour. Roura fait partie d'une Opération d'intérêt national.



Roura, à 25 km au sud-est de Cayenne (Guyane), va être densifiée.

ÉVITER LES ATTEINTES À L'ENVIRONNEMENT, LES RÉDUIRE, LES COMPENSER



Des hirondelles ont niché sur les passerelles malgré les nids mis à leur disposition sur le chantier de l'élargissement de l'A9 près de la frontière espagnole (Pyrénées-Orientales). Ici, viaduc de Calcine.

« J'ai bouillonné de temps en temps cet après-midi, » a déclaré Serge Muller, président du Conseil national de protection de la nature au terme du 1^{er} atelier de l'aménagement et du génie écologique, le 5 juin⁽¹⁾.

Philosophie et pratique se sont côtoyées lors de cette demi-journée sur les atteintes des travaux publics à l'environnement. Comment les éviter d'abord, réduire celles qui n'ont pas pu l'être et compenser les effets résiduels. Cette démarche "ERC" est définie par le ministère de l'Écologie solidaire et diffusée auprès des acteurs de l'aménagement et du développement économique⁽²⁾.

« L'ERC est un moyen et non un but, a souligné M. Muller à la tête de l'organisme qui émet des avis sur les espèces protégées pour certains projets. Le but est de maintenir et rétablir le bon état des populations de faune et flore, ordinaires ou menacées. Il faut s'y prendre très en amont des projets, globaliser l'approche pour d'abord "éviter". La restauration de milieux n'est jamais satisfaisante car des espèces ne reviennent pas. Quand l'ERC ne donne rien, il faut savoir renoncer au projet ou le reconsidérer. »

« Il ne s'agit pas de s'occuper des bestioles, a affirmé Patrice Valentin, président de l'Union professionnelle du génie écologique. Le génie écologique, c'est la résilience des activités humaines à l'intérieur des écosystèmes. Les êtres humains ne peuvent pas se déclarer autonomes par rapport au vivant. Génie civil et génie écologique doivent davantage collaborer. » Le Commissariat général au développement durable (CGDD) géolocalise les

sites de mesures compensatoires, seul maillon que les déclarants doivent obligatoirement mentionnés. Les données seront accessibles au public cet été.

→ Mieux définir l'ERC

Parallèlement, le CGDD a publié un guide, début 2018, pour aider à la définition des mesures ERC : « Il fallait redéfinir l'ERC car son application est hétérogène, a précisé Gurvan Alligand. L'environnement s'entend au sens large : faune, flore, eau, air, climat, bruit, patrimoine, paysage. »

Venons-en au concret. Lors des travaux de la déviation de Troissereux (Oise), a été réalisée une tranchée couverte⁽³⁾ en reconstituant le milieu naturel au-dessus. Depuis 2016, la plupart des espèces animales sont revenues sauf les reptiles. Les plantes envahissantes ne sont pas là. RTE a choisi le tracé le moins pénalisant pour une liaison entre deux postes électriques en Camargue (Bouches-du-Rhône). Le fuseau retenu suite aux études d'Éco Med, se situe hors des sansouires (marais).

Eiffage Infrastructures a réduit l'impact de l'élargissement de l'autoroute A9 (Pyrénées-Orientales) sur la reproduction des hirondelles. Des filets les ont éloignées des tabliers. Des nichoirs ont été placés à l'abri. Le suivi montre que des nids ont été construits sur les passerelles de travaux.

→ Le suivi ne coûte pas cher

Le suivi - obligatoire - des mesures ne coûte pas cher. « Il permet de savoir si elles conviennent ou s'il faut en trouver d'autres, a indiqué Serge Muller. La résilience des écosystèmes est mal connue. » Le Centre de ressources génie écologique⁽⁴⁾ qui mutualise les expériences depuis quatre ans, devrait y remédier. ■

⁽¹⁾ Organisé par la FNTP et l'Union professionnelle du génie écologique à Paris.

⁽²⁾ Voir www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eviter-reduire-et-compenser-impacts-sur-lenvironnement.

⁽³⁾ Partenariat public-privé avec le Conseil départemental.

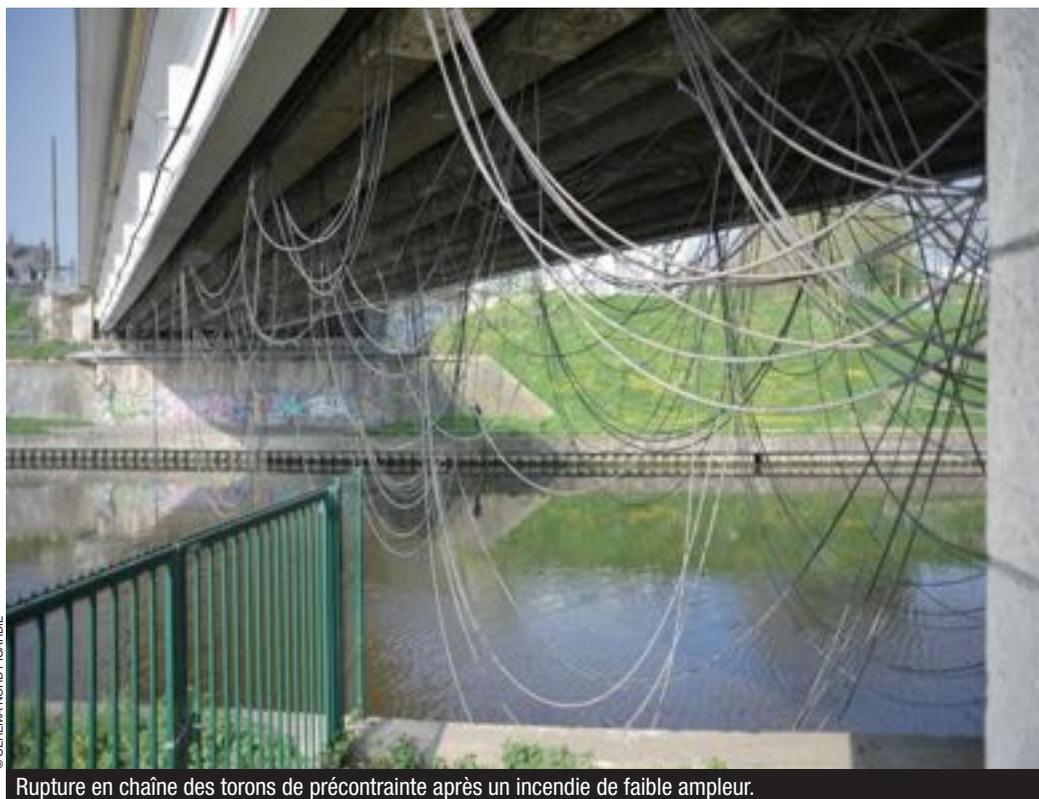
⁽⁴⁾ www.genieecologique.fr, Agence française pour la biodiversité.

LOIS FONDATRICES

La démarche "éviter, réduire, compenser" les atteintes à l'environnement se construit depuis plus de quarante ans.

- 1976 : la loi relative à la protection de la nature l'introduit, n°76-629.
- 2009-2010 : les lois Grenelle de l'environnement en renforcent les principes, n°2009-967 et 2010-788.
- 2016 : loi relative à la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, n°2016-1087.

RÉPARATION D'UN PONT PRÉCONTRAIT À VALENCIENNES (NORD)



Rupture en chaîne des torons de précontrainte après un incendie de faible ampleur.

Le 7 avril 2017, un incendie de faible ampleur s'est déclaré sous la culée ouest du pont Villars de Valenciennes (Nord). Un premier câble de précontrainte s'est rompu avec, pour conséquences, la rotation du bâti d'ancrage puis sa projection sur le capot de protection du câble situé à l'arrière de l'ancrage de la poutre suivante côté nord.

Un second câble a cédé. Il a heurté et rompu le câble situé à l'avant de l'ancrage de la poutre suivante côté sud. Puis, l'ensemble des câbles se sont rompus jusqu'à la poutre de rive côté sud. Cet ouvrage, construit en 1951 sur l'avenue Villars, franchit l'Escaut dans le centre-ville. Sa portée est de 64 m sur 13,80 m de large⁽¹⁾.

Le tablier, très biais, se compose de 10 poutres en béton d'une hauteur de 2,88 m, espacées (entre axes) de 1,17 m, et précontraintes longitudinalement par 28 câbles 12 phi 7 (procédé Stup Freyssinet).

Les poutres sont reliées entre elles par 10 entretoises et un hourdis précontraints transversalement. L'ouvrage a été renforcé en 2000. La précontrainte additionnelle comprend 20 câbles « extérieurs », soit une paire de câbles de 7 torons T15S, filants et disposés de part

et d'autre de chacune des poutres, en partie inférieure. Chaque paire de câbles est ancrée sur un bâti métallique commun appuyé à chaque extrémité de poutre. Ce bâti s'appuie contre le cachetage en béton qui protège les ancrages des câbles intérieurs des poutres du tablier.

→ Réouverture partielle

Suite à l'incendie, la ville de Valenciennes, propriétaire et gestionnaire du pont, a interdit toute circulation au-dessus et en dessous.

Les quatre derniers câbles de précontrainte extérieure non rompus ont alors été détendus et l'ensemble des câbles ont été démontés. La culée a été étayée. La Ville a demandé au Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) d'examiner la remise en circulation restreinte sur l'ouvrage, avant réparation. Le Cerema a ainsi réalisé une évaluation structurale de l'ouvrage, basée sur une modélisation, un recalcul du tablier, et des investigations *in situ*. Il a émis un avis favorable à la réouverture de deux voies sur trois aux véhicules légers, avec instrumentation de la structure. L'ouvrage a été rouvert en partie le 24 mai 2017. Le Cerema a poursuivi sa mission auprès de la Ville jusqu'à réception de la

réparation, huit mois après l'incendie. Freyssinet a été retenue pour les travaux sous maîtrise d'œuvre du bureau d'études Acogec.

→ Double gainage

La précontrainte devait être, a priori, remplacée à l'identique sauf en ce qui concerne l'injection des câbles de précontrainte extérieure. Il fallait un produit souple afin d'éviter les ruptures brutales de câbles. De plus, la conception des blocs d'ancrages devait intégrer des dispositions pour éviter toute rupture en chaîne. Freyssinet a proposé des paires de torons gainé/graissé (T15S) enfilés dans une gaine PEHD injectée au coulis de ciment. Ce « double gainage » favorise la pérennité et évite toute rupture ou fouettage de câble lors d'une rupture. Le bloc d'ancrage métallique autorise la rupture d'un câble sur deux, avec prise en compte d'un effet « dynamique ». Ces dispositions faciliteront aussi la maintenance.

Le pont a été réouvert en novembre. Coût de la réparation : 750 000 € HT tout compris. ■

Source : Laurent Labourie, expert ouvrages d'art, et Éric Delahaye, chargé des groupes ouvrages d'art, Cerema Nord Picardie.

⁽¹⁾ Ouvrage à poutres précontraintes VIPP de première génération.

STATION DE TRANSFERT D'ÉNERGIE AU MAROC

Vinci Construction, mandataire d'un consortium, a remporté le contrat d'une station de transfert d'énergie par pompage (Step) au Maroc, à Abdelmoumen, dans la région d'Agadir. Une step pompe de l'eau vers un bassin haut et la turbine vers un bassin bas pour produire de l'électricité, et vice-versa, ici jusqu'à 20 fois par jour. Coût : 284 millions d'euros.

Il faut quatre ans pour implanter les deux stockages avec une dénivellée de 550 m, creuser la centrale à flanc de colline, poser la conduite de transfert de 3 km, installer la centrale. Les 2 turbines Francis de 175 MW sont mises au point pour ce site et installées par Andritz Hydro.

UNE MARQUE DE DÉCONSTRUCTION

Les 11 établissements de déconstruction, filiales de Colas Île-de-France Normandie, sont réunis sous la marque Premys, tout en conservant leur nom. Ils deviennent des agences.

Ainsi, la démolition du Cnet Orange à Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) dans le cadre du projet "Issy cœur de ville" a-t-elle été confiée à l'agence Genier-Deforge Île-de-France-Premys.



Déconstruction à Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) par un établissement de Colas.

SOLAIRE ÉLECTRIQUE SUR SITES DE DÉCHETS

Engie s'installe chez Suez. Les deux groupes ont signé un partenariat en mars. Le premier construit et exploite des parcs solaires photovoltaïques implantés sur les sites d'installations de recyclage et de traitement des déchets du second. Le potentiel serait de 1 GW au total. Premier projet, lancé cette année : une centrale au sol de 12 MW à Drambon (Côte-d'Or).

100 MILLIONS DANS UNE CIMENTERIE

Le premier lot de la modernisation de l'usine Lafarge-Holcim de Martres-Tolosane (Haute-Garonne) va être réalisé par Eiffage Génie Civil. Il s'agit des fondations d'une ligne de cuisson. L'industriel s'engage dans un ensemble d'améliorations du site pour un montant total de 100 millions d'euros.

RÉSEAU FERRÉ AUX ÉMIRATS ARABES UNIS

Egis sera assistant à maîtrise d'ouvrage auprès d'Etihad Rail pour les phases 2 et 3 du réseau ferroviaire prévu pour relier l'Arabie Saoudite, les Émirats arabes et Oman en 2024.

La phase 2 ajoute 600 km de voies aux 264 km existants et la phase 3, 250 km.

PL FAVIER AUX MAINS DE SPIE BATIGNOLLES

Spie Batignolles rachète le groupe PL Favier qui réalise des travaux de voirie, réseaux, terrassement et aménagement de surface en Isère, Rhône et Savoie. Le groupe comprend PLF, Blondet, Dumas et RIE. Il est placé sous la direction de Malet, filiale de Spie Batignolles.

INTERCONNEXION ÉLECTRIQUE AVEC L'ANGLETERRE



© RTE

L'interconnexion entre les secteurs de Caen et de Southampton (Angleterre) comprend 202 km sous la Manche et 26 en enfouissement.

La France et l'Angleterre seront reliées par une 2^e interconnexion électrique en 2020, la 1^{re} remontant à 1986. La liaison est sous-marine sur 202 km entre Merville-Franceville (Calvados) en bord de mer et Fareham dans la baie de Southampton. Elle est enfouie sur 24 km en France pour rejoindre le poste de Tourbe à Bellengreville au sud de Caen, et sur 2 km en Angleterre. Pour cela, Réseau de transport d'électricité (RTE) et National Grid (Royaume-Uni) ont créé une filiale - Interconnexion France Angleterre 2 (IFA2). Elles se partagent le coût - 760 millions d'euros - et l'entretien. La phase de développement a bénéficié d'une aide de 3 millions de la Commission européenne au titre de "projet d'intérêt communautaire".

→ Déminer le fond marin

Le chantier de la station de conversion à Bellengreville a commencé début 2018. L'enfouissement en Normandie était réalisé à 40 % début juin. Ruisseaux et voies

ferées sont franchis par forage dirigé ou fonçage (2 km sur 24).

Les études, la concertation, les procédures administratives ont duré de 2009 à 2017. Le passage sous la Manche a nécessité la recherche des obus et autres munitions restés au fond ainsi que des reconnaissances géotechniques et géophysiques pour fixer l'itinéraire des câbles. Les travaux durent deux ans. Mise en service prévue en octobre 2020.

→ Autres liaisons sous-marines

L'interconnexion, d'une puissance de 1 000 MW, optimise les moyens de production d'électricité de chaque pays, offrant un débouché aux kilowatts-heure. RTE envisage d'autres interconnexions sous-marines : une 3^e avec le Royaume-Uni, entre Cherbourg (Manche) et Exeter (Devon) pour 2024 (220 km, 1 400 MW), une entre Bretagne et Irlande en 2025 (600 km, 700 MW), et une vers l'Espagne par le golfe de Gascogne en 2025 (2 000 MW, 370 km). ■

MINI CENTRALE SUR CANAL D'IRRIGATION

Une mini centrale hydraulique est installée sur un canal d'irrigation près d'Eyguières dans les Bouches-du-Rhône. Le canal de Craponne, qui relie la Durance à Arles, alimente en eau des agriculteurs dont ceux de la plaine de Crau réunis dans une Association syndicale des arrosants⁽¹⁾.

Son débit constant pendant les huit mois d'arrosage - 15 m³/s - et une dénivellée de 12 m dans le secteur d'Eyguières conviennent à l'implantation d'une centrale sur l'eau de 1,5 MW.

→ Conduite forcée de 460 m

Un groupe d'intérêt économique a été créé entre l'association des arrosants et la Société du Canal de Provence (SCP), celle-ci apportant son ingénierie et sa capacité financière.

L'électricité produite, environ 5 GWh/an, est rachetée par EDF à un tarif préférentiel pendant vingt ans, ce qui permet de rembourser les 4,5 millions d'euros que coûte la centrale.

→ Scier le voile du canal

Le GIE dure vingt-cinq ans, l'ouvrage étant restitué à l'association ensuite. Les garde-canaux surveillent et entretiennent au jour le jour, la SCP se char-



© SOCIÉTÉ DU CANAL DE PROVENCE

Enfouissement de la conduite forcée de 2 600 mm de diamètre le long du canal de moins de 5 m de large à cet endroit.

ge de la maintenance et des pannes. Les travaux ont commencé fin 2017 et se terminent en juin 2019 après plusieurs semaines d'essais. Ils consistent d'abord en une prise sur le canal à l'aval du partiteur d'Eyguières. L'eau circule sur 460 m dans une conduite forcée à créer avant d'être turbinée dans la centrale (190 m²) puis de retourner dans le canal. Le voile du canal doit être scié à l'endroit

de la prise et de la restitution. Ces opérations ne peuvent avoir lieu qu'au moment où le canal est à sec, de novembre à fin février.

La réalisation a été confiée à un groupement d'entreprises composé de Rampa, Roux TP, Eiffage Énergie et HPP. ■

⁽¹⁾ Association syndicale constituée d'office des arrosants de la Crau, sous tutelle du préfet, qui regroupe des propriétaires irrigants.

ÉCLAIRCIR LA CERTIFICATION DES GÉOMEMBRANES



Membrane étanche pour une cellule de stockage de déchets à Zahlé (Liban).

La nouvelle version du référentiel "Géomembranes certifiées" s'applique depuis le 17 mai. Les producteurs ont un an pour se mettre en conformité.

L'Association française des producteurs de géomembranes (Aprodeg) et l'Association pour la promotion de la qualité (Asqual) y ont travaillé pendant quatre ans.

Cette certification avait été initiée par le Comité français des géosynthétiques au début des années 1990. Il était nécessaire de la rendre plus cohérente avec la certification de service Asqual sur l'application des géomembranes, de prendre en compte les évolutions réglementaires et de mieux répondre aux besoins des utilisateurs sur le terrain.

Le groupe qui a travaillé sur la refonte s'est attaché à améliorer la lisibilité, l'appropriation et l'exploitation du référentiel. Les exigences de qualité et les étapes de la certification ont été précisées.

Les géomembranes concernées sont celles définies dans la norme NF P84-500 (avril 2013).

Parmi les changements, citons l'introduction de seuils de performance sur les caractéristiques mécaniques, un test de soudabilité, des plages de variation autorisées, un contrôle des performances du produit dans le temps, etc.

→ Les bicolores et les texturées

Dans le sillage de cette refonte, devrait évoluer la caractérisation des géomembranes bicolores et les texturées.

Rappelons que les géomembranes sont imperméables. Elles sont employées sous les bassins en terre, sur les parois de tunnels ou de tranchées, en sous-couche de route ou de voie ferrée et en centres de stockage de déchets.

En savoir plus auprès de l'Asqual : info@asqual.com ■

ESSAIS DE PELOUSE POUR TRAMWAY

L'agglomération de Caen (Calvados) change de tramway et ne fait pas les choses à moitié. Les abords de son modèle sur rail, effectif en 2019 en remplacement de celui sur pneus, seront en herbe sur une grande partie. Des essais de pelouse ont été menés à la Colline aux oiseaux, parc de 17 ha situés au nord-ouest de la ville. Le comportement de 16 parterres composés de deux substrats et de mélanges de semis a été suivi pendant deux ans, dont une observation par le Centre permanent d'initiatives pour l'environnement de la vallée de l'Orne.

Quatre mélanges de semis ont été retenus, selon leur résistance aux intempéries, à la sécheresse, à l'ensoleillement, au piétinement, leur aspect esthétique, leur densité et leur capacité à se régénérer.

TROIS JOURS AU CHEVET DU RISQUE ROCHEUX

Des visites sont organisées le 3^e jour de la 4^e édition du symposium Rock Slope Stability (13-15 novembre, Chambéry). Trois sites sont proposés : le flanc nord du Mont Granier, entre Isère et

Savoie, victime d'un glissement de terrain majeur en 1248 et de deux éboulements en 2016 pour n'évoquer que les derniers ; les protections dans les gorges de l'Arly, entre Ugine (Savoie) et Megève

(Haute-Savoie), où la route, fréquemment coupée, revient cher ; la station d'essais de chutes de blocs de Montagnole (Savoie).

La région Auvergne-Rhône-Alpes, à 80% en montagne, est particulièrement concernée par les chutes de pierres.

La hausse des températures et les pluies plus fréquentes et intenses compromettent la stabilité des versants.

Rock Slope Stability est organisé par l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (Irex) et le cluster Indura, dans le cadre du projet national C2rop (Chutes de blocs, risques rocheux et ouvrages de protection, Irex).

→ Chutes de blocs et mines

Plus de soixante interventions auront lieu au symposium. Citons celle sur la RN1 à La Réunion, une autre sur les chutes et les exploitations minières, et celle sur le Mont Granier.

En savoir plus sur : www.c2rop.fr/symposium-rss-2018/visites-techniques/ ■



Protections de la route dans les gorges de l'Arly (Savoie et Haute-Savoie), une des visites proposées lors du symposium.



Seize parterres de pelouse ont été plantés dans un parc de Caen (Calvados).

GÉOTHERMIE 2020

La prochaine conférence World Geothermal Conference se tient à Reykjavik en Islande, du 27 avril au 1^{er} mai 2020.

L'événement a lieu tous les cinq ans.

Les personnes qui veulent proposer une conférence doivent envoyer un résumé avant le 31 janvier 2019 puis leur texte avant le 30 juillet.

MINI PELLE ÉLECTRIQUE

JCB propose sa 1^{re} mini pelle électrique. La 19C-1 est quasi silencieuse avec 7 dB(A). Ne "fumant" pas, elle convient au travail à l'intérieur d'un bâtiment ou dans une zone urbaine sensible. Elle est équipée de trois batteries lithium-ion qui stockent jusqu'à 15 kWh. Elle se charge en six heures à moins d'opter pour la charge rapide en deux heures et demie.



Cet engin est peu bruyant.

MORTIER PROJETÉ SANS TREILLIS

Deux mortiers Weber destinés à la réhabilitation de canalisations hydrauliques visitables, se projettent sans pose préalable d'un treillis soudé. Ils comportent eux-mêmes des fibres métalliques amorphes Fibraflex (Saint-Gobain Seva).

Ces produits font gagner du temps de pose et de la place de stockage.

GUIDE STATION À HYDROGÈNE

Un guide pratique sur comment construire une station de recharge à hydrogène est en préparation.

Il est rédigé par la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies Territoire d'énergie, l'Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible avec le consortium Mobilité hydrogène France.

Vingt stations à hydrogène fonctionnent déjà, selon la FNCCR.

www.territoire-energie.com

DURABILITÉ DU POLYSTYRÈNE EN REMBLAI

L'avis technique du Compostyrène, blocs de polystyrène à utiliser en remblai, a été renouvelé en avril pour sept ans par l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité. L'Idrirm n'a relevé aucune pathologie dès lors que les données de l'AT ont été respectées. Il souligne la nécessité d'une mise en œuvre soignée et d'un bon entretien.

Colas le propose et le dimensionne pour ses clients depuis trente-cinq ans, ce qui représente 330 chantiers en France. La plus forte épaisseur installée atteint 23 m.

Ces blocs servent à constituer un remblai léger sur sols compressibles ou instables. Ils se substituent en partie à un remblai par exemple à proximité d'une culée d'ouvrage. Léger, il sera supporté entre une chaussée et une voûte de tunnel. Il comblera une cavité ou rebouchera un ouvrage souterrain désaffecté.

→ Attention aux poussées

Sa masse volumique est 100 fois moindre que celle d'un matériau courant de remblais, d'après Colas. Selon les cas, elle est comprise entre 15-17 kg/m³ (zone piétonne) et 25-27 kg/m³ quand les sollicitations sont fortes. Toujours prévoir une couche supérieure qui le



Remblai de polystyrène - blocs de 6 m de long, 1,24 m de large et 64 cm d'épaisseur - sur la RD 908 en direction de La-Foux-d'Allos (Alpes-de-Haute-Provence) posé par l'agence Cozzi de Colas Midi-Méditerranée en 2016.

mette en compression. La création de vides entre les blocs, quand elle est envisageable, économise de 15 à 35 % du volume utilisé.

Colas étudie cette configuration couche par couche.

→ Caractéristiques à prendre en compte

Si la nappe phréatique est proche, l'eau doit pouvoir remonter hors des blocs, sans les pousser. Entre le talus - con-

forté si besoin - et les blocs, il est possible de boucher avec des chutes de polystyrène.

Le matériau est recyclable. Il est broyé. Les billes entrent dans la fabrication. Il est combustible et sensible aux hydrocarbures (pentes, caniveaux nécessaires). Il doit être protégé des ultraviolets.

En paroi verticale, il est recouvert d'un béton projeté, d'un enduit, de pierre, de tôle ou de bardage bois. ■

PONCEAU EN BLOCS DE BÉTON

Ce petit pont se pose rapidement à partir d'une seule berge d'un ruisseau et hors de la limite de son lit mineur (écoulement hors crues). Il se compose

de blocs de béton préfabriqués qui s'emboîtent les uns dans les autres.

Une fois en place, il peut être modifié, rehaussé, agrandi, etc. Il peut porter un

ralentisseur, un trottoir, un garde-corps, etc.

Le tablier peut être en partie enterré pour conserver la continuité de la bande de roulement.

→ Initiative astucieuse

Le ponceau modulable de Bongarzone a reçu la mention spéciale "initiative astucieuse" du prix Infrastructures pour la mobilité, la biodiversité et le paysage de l'Institut des routes, des rues, des infrastructures et de la mobilité, fin 2017. Signalons également la mention "continuités écologiques" décernée aux trois programmes de requalification du réseau en faveur de la biodiversité de Vinci Autoroutes.

Depuis 2010, près de 200 opérations multi partenaires sur 4 422 km ont contribué à maintenir ou restaurer l'éventail des espèces de faune et flore sur les emprises routières et à reconnecter les territoires coupés par les grands axes. Dépense : 180 millions d'euros. ■



Pont démontable et transformable.

INTERVENTIONS D'URGENCE CONTRE LES SUBMERSIONS MARINES

Se préparer à bien réagir en cas de catastrophe, c'est le but du guide *Interventions d'urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines*, publié par le Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema).

Les auteurs se sont inspirés du retour d'expérience suite à la tempête Xynthia (hiver 2010). Se préparer suppose acquérir les connaissances techniques, prévoir l'organisation et les interventions. Sont présentées les configurations les plus courantes.

Le guide de 92 pages comporte trois parties : cadre stratégique des interventions d'urgence ; actions particulières de préparation et de gestion de crise ; principales techniques d'intervention sur les ouvrages.

www.cerema.fr ■



AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 5 AU 7 SEPTEMBRE

4^e conférence internationale Structures en génie civil et matériaux de construction durables

Lieu : Yogyakarta (Indonésie)
<http://conference.tsipil.ugm.ac.id/scescm/>

• 16 AU 21 SEPTEMBRE

Conférence internationale sur les géosynthétiques

Lieu : Séoul (Corée du Sud)
www.11icg-seoul.org

• 17 AU 21 SEPTEMBRE

Systèmes de transport intelligent

Lieu : Copenhague (Danemark)
<http://itsworldcongress.com>

• 19 SEPTEMBRE

Solutions de dépollution des sites et sols pollués (réseau Essort)

Lieu : Paris (Maison de la RATP, 12^e)
www.ademe.fr

• 19 AU 21 SEPTEMBRE

Mégastructures de demain (40^e symposium labse)

Lieu : Nantes
www.iabse.org

• 25 ET 26 SEPTEMBRE

8^e assises Port du Futur

Lieu : Paris (FNTP)
www.portdufutur.fr

• 7 AU 11 OCTOBRE

Congrès de la Fédération internationale du béton

Lieu : Melbourne (Australie)
<http://fibcongress2018.com>

• 10 ET 11 OCTOBRE

4^e congrès Idrim

Lieu : Lille
www.idrim.com

• 16 AU 19 OCTOBRE

67^e congrès de l'industrie minérale

Lieu : Clermont-Ferrand
www.lasim.org

• 28 AU 31 OCTOBRE

Cycle de vie en génie civil

Lieu : Gand (Belgique)
www.ialcce2018.org

• 7 AU 10 NOVEMBRE

BFUP et structures

Lieu : Fuzhou (Chine)
<http://2018uhpc.fzu.edu.cn/conf/>

• 13 AU 15 NOVEMBRE

Rock Slope Stability (C2rop)

Lieu : Chambéry (Savoie)
www.c2rop.fr/symposium-rss-2018/

• 20 AU 22 NOVEMBRE

Salon des maires et des collectivités locales

Lieu : Paris (Porte de Versailles)
www.salondesmaires.com

• 27 AU 30 NOVEMBRE

Pollutec

Lieu : Lyon
www.pollutec.com

• 11 DÉCEMBRE

Energy Class Factory (performance énergétique et hydrique, usines et infrastructures)

Lieu : Lyon (Cité internationale)
www.ademe.fr

FORMATIONS

• 17 ET 18 SEPTEMBRE

Gestion des sols et sites pollués (1^{re} partie)

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

• 2 AU 4 OCTOBRE

Traitement des risques liés aux cavités souterraines

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

• 9 ET 10 OCTOBRE

Comportement des sols sous action sismique : mesure, analyse, interprétation

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

• 9 AU 11 OCTOBRE

Réhabilitation des ouvrages souterrains visitables

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

• 17 ET 18 OCTOBRE

Projet d'aménagements fluviaux (1^{re} partie)

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

• 22 OCTOBRE

Autorisation environnementale unique

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

• 22 ET 23 OCTOBRE

Eurocode 2 bâtiment : structures en béton précontraint

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

• 29 AU 31 OCTOBRE

Techniques d'excavation et de soutènement en site urbain

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

NOMINATIONS

BANQUE DES TERRITOIRES :

Olivier Sichel, directeur général adjoint de la Caisse des dépôts et consignations, devient directeur général de la Banque des territoires, émanation de la CDC.

COLAS :

Delphine Lombard est nommée directrice de la communication du groupe. Elle prend la succession de Sophie Sadeler.

PROGRAMMATION EMPLOI ET COMPÉTENCES :

Laurence Parisot est chargée par les ministres du Travail et de la Transition écologique et solidaire d'élaborer une programmation de l'emploi et des compétences liée à la transition écologique et énergétique.

RÉGION ÎLE-DE-FRANCE :

Philippe Laurent devient délégué spécial chargé du Grand Paris Express (métro) à la Région.

SFIC :

Laure Héliard est la nouvelle déléguée générale du Syndicat français de l'industrie cimentière. Elle succède à Anne Bernard-Gély.

SPIE BATIGNOLLES :

Lou Martinez Sancho est directrice de l'innovation, nouvelle entité du groupe.

SETEC L'INGÉNIERIE, ACTEUR DÉCISIF DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

DANS UN MONDE OÙ LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE AUGMENTE ET OÙ LES CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES DÉTERMINENT DE PLUS EN PLUS NOS CHOIX, COMMENT ASSURER L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE NOS MOYENS DE TRANSPORT, DE NOS INDUSTRIES, DE NOS QUARTIERS ?
ENTRETIEN AVEC ANNE-MARIE CHOHO, DIRECTRICE GÉNÉRALE DE SETEC.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1- Anne-Marie Choho,
directrice générale
de Setec.

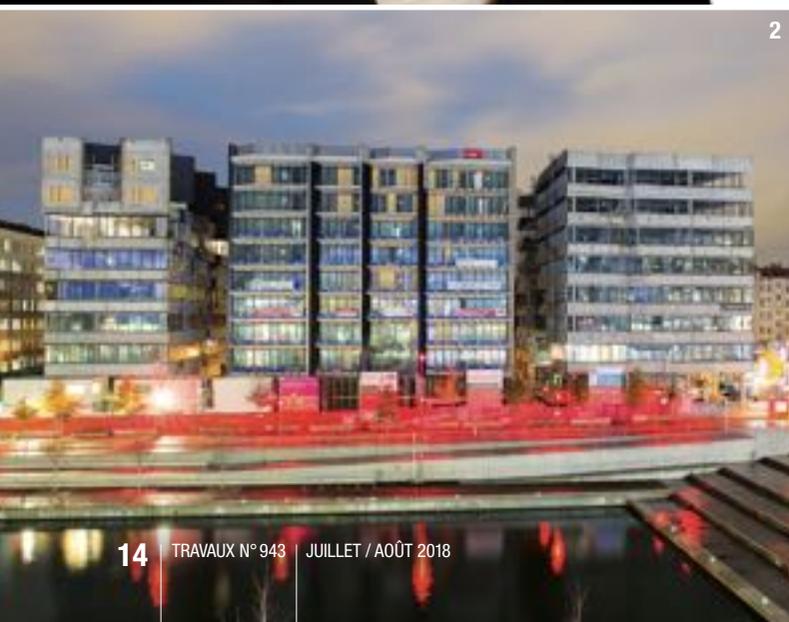
À TRAVERS SES SERVICES D'INGÉNIERIE ET SON SAVOIR-FAIRE ACQUIS DANS LES PROJETS INDUSTRIELS ET D'INFRASTRUCTURES, SETEC APORTE À SES CLIENTS DES SOLUTIONS GLOBALES QUI S'APPUIENT SUR UNE EXPERTISE PLURIDISCIPLINAIRE ET DES MÉTHODES ÉPROUVÉES EN MANAGEMENT DE PROJETS COMPLEXES.

C'EST CE QUE NOUS PRÉSENTE ANNE-MARIE CHOHO, DIRECTRICE GÉNÉRALE DE SETEC AU TRAVERS D'UNE SÉRIE D'EXEMPLES SUR TROIS AXES : L'INGÉNIERIE CONÇOIT DES INSTALLATIONS QUI SONT ÉCONOMES EN ÉNERGIE, VOIRE À ÉNERGIE POSITIVE ; ELLE REND POSSIBLE LA PRODUCTION COMPÉTITIVE D'ÉNERGIE DÉCARBONÉE, RENOUELABLE ET NUCLÉAIRE ; ENFIN, ELLE INNOVE CONSTAMMENT EN INTRODUISANT LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS LES INSTALLATIONS EXISTANTES ET LES PROJETS ÉNERGÉTIQUES.

Quels exemples dans la série des ingénieries économes en énergie ?

Dans la série des installations économes en énergie, nous pouvons citer trois exemples. Les deux premiers concernent des groupes de bâtiments,

des développements urbains ou tertiaires à énergie positive : Hikari à Lyon Confluence et Air Liquide à Paris-Saclay. Le troisième est à finalité industrielle puisqu'il s'agit du centre de traitement d'ordures ménagères de Saint-Ouen. Hikari est l'un des projets pionniers de



2



3

FIGURE 1 © SETEC - FIGURES 2 & 3 © KENGO KUMA/CRB

développement mixte à énergie positive consistant en trois bâtiments neufs de bureaux, commerces et logements de 13 000 m² dans le quartier de la Confluence à Lyon.

Sur ce projet dessiné par l'architecte japonais Kengo Kuma, le rôle de l'ingénierie était de tirer parti des différents usages pour concevoir un îlot à énergie positive.

1 600 m² de panneaux photovoltaïques sont intégrés en toiture et en façade. Le système de ventilation naturelle est conçu pour permettre de surventiler la nuit pour emmagasiner du froid, via des ballons d'eau chaude et des matériaux à changement de phase, pour réduire de ce fait le besoin de climatisation le jour. Nous avons également travaillé à la modélisation de la forme des bâtiments afin de valoriser au maximum la lumière naturelle. Enfin, nous avons inclus en sous-sol une cogénération d'énergie au colza et utilisé la géothermie.

Quelle est l'innovation dans le projet d'Air Liquide à Paris-Saclay ?

Air Liquide a décidé de reconstruire son centre de recherche installé depuis le début des années 70 sur un terrain de 8 hectares situé aux Loges-en-Josas et d'en faire une réalisation exemplaire en performance énergétique dans le cadre du nouveau Paris-Saclay.

Setec assure, aux côtés de l'architecte Michel Remon et associés, la maîtrise d'œuvre complète en conception, pilotage, ainsi que le suivi des travaux (OPC) de cette opération en cours : après démolition/désamiantage des bâtiments existants et dévoiement des réseaux, construction d'un bâtiment neuf d'environ 14 700 m² de planchers pour accueillir 450 postes de travail comprenant des bureaux,

ANNE-MARIE CHOHO : PARCOURS

Diplômée de l'École Centrale de Paris (1988), Docteur en chimie et génie des procédés industriels (1991), Anne-Marie Choho a réalisé l'essentiel de sa carrière dans le domaine de l'énergie, du nucléaire en particulier, dans les projets de construction neuve et de rénovation d'installations nucléaires.

Sa thèse de doctorat en chimie lui a permis d'améliorer les procédés industriels pour l'usine de retraitement de la Hague (Manche).

Anne-Marie Choho a débuté sa carrière à la Société Générale pour les Techniques Nouvelles (SGN) en 1992 en France.

Après cinq années en tant qu'ingénieur de recherche et développement, puis ingénieur procédé, elle a quitté la France pour les États-Unis où elle a dirigé pendant dix ans des activités d'ingénierie dans des projets de traitement de déchets nucléaires et de recyclage de matières : chez Lockheed Martin/CH2MHill de 1996 à 2003 à Hanford dans l'état de Washington, puis Duke-Cogema-Stone&Webster/Shaw Consortium, à Charlotte en Caroline du Nord, de 2003 à 2006.

De retour en France, elle est nommée Directrice de la division Nuclear Power Plant Engineering d'Areva en 2007, puis Directrice de la division Engineering and Projects en 2011, et Directrice du Support Opérationnel, membre du comité exécutif en 2014.

Anne-Marie Choho a été nommée Directrice Générale Adjointe du groupe Setec en décembre 2016, puis Directrice Générale en avril 2018.

À l'heure où le nucléaire tout autant désormais que l'éolien sont si souvent décriés voire combattus, l'un de ses objectifs est de mettre le savoir-faire de l'ingénieur au service d'une réconciliation entre l'industrie, la technique et leur acceptation publique et environnementale.

2- Hikari est l'un des projets pionniers de développement mixte à énergie positive.

3- Le projet Hikari à Lyon, a été dessiné par l'architecte japonais Kengo Kuma.

4- Le nouveau centre de recherches d'Air Liquide à Paris-Saclay (architecte : Michel Remon & Associés).

un laboratoire et un atelier de réalisation des installations expérimentales. L'ingénierie a permis de répondre à l'ambition d'Air Liquide pour ce centre d'excellence, par exemple : en dimensionnant en BIM des locaux flexibles afin de pouvoir en changer éventuellement l'usage, très communicants entre eux et à ventilation naturelle ; en positionnant 300 m² de panneaux photovoltaïques ; enfin en mettant en œuvre la production d'électricité via une pile à combustible, technologie à rendement élevé et sans émission de polluants.

Quel est le volume occupé par cette pile à combustible ?

L'unité installée chez Air liquide a globalement les dimensions d'un conteneur standard : à savoir environ 6 m de long, 2,5 m de large pour une hauteur de 3,5 m. Cela constitue donc un gros équipement technique mais en rapport avec la taille du bâtiment.

Quant à la centrale du Sycrom à Saint-Ouen ?

Pour la centrale de valorisation énergétique de Saint-Ouen, l'intervention de Setec, qui est maître d'œuvre, vise à permettre à cette installation existante d'augmenter la production d'énergie, c'est-à-dire de récupérer l'énergie fatale générée par les fumées et, en même temps, de capter le gaz carbonique issu du traitement en le mettant sous une forme qui le rendra valorisable.

Cette usine traite les déchets de 17 communes et l'énergie récupérée des fumées alimentera 108 500 logements, ce qui est significatif.

Sur le plan technique, Setec a conçu le procédé de traitement des fumées et pilote le programme de R&D de valorisation du CO₂ au travers d'installations pilotes.

Pour mener à bien l'opération, les meilleures équipes internationales - Canada, Espagne, France, Suède - ont été identifiées pour mettre au point la transformation du CO₂ en matériau valorisable via des microalgues.

À ceci s'ajoute un projet architectural et artistique ambitieux, par l'architecte Reichen et Robert & Associés, de réinsertion de l'usine dans son environnement urbain de façon à la « réconcilier » avec ses riverains, notamment en minimisant les nuisances provoquées actuellement. ▶



En ce qui concerne la production compétitive d'énergie décarbonée ?

Dans ce domaine, nous intervenons pour des producteurs d'énergie décarbonée afin, soit d'améliorer des installations existantes, soit d'en concevoir de nouvelles qui soient compétitives. Deux exemples sont significatifs : la petite centrale hydro-électrique de Bonneville en Haute-Savoie et le parc éolien d'Ashegoda en Éthiopie.

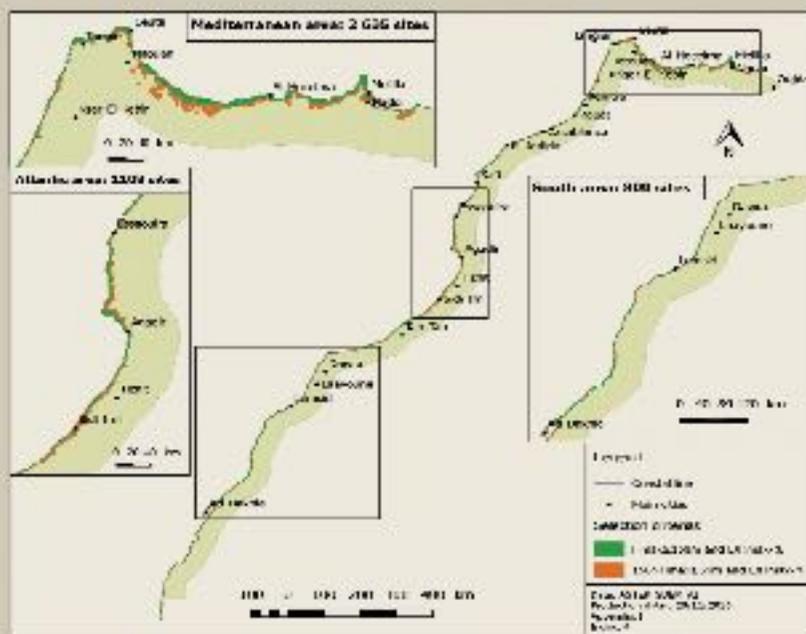
Pour Bonneville, l'équipe de Setec spécialisée dans ce type d'ouvrage est intervenue en tant que maître d'œuvre et rédacteur des dossiers environnementaux. Elle avait pour mission de concevoir et superviser la construction d'une nouvelle centrale hydroélectrique en minimisant l'impact sur les riverains et l'environnement tout particulièrement en ce qui concerne l'emprise.

La centrale comporte un barrage mobile, une prise d'eau, un dessableur, une conduite forcée et une usine avec le groupe turbo-alternateur ainsi que l'ensemble des installations électriques d'évacuation de l'énergie et de raccordement au réseau. Elle a une puissance de 3 MW et une production de 12 GWh/an.

Le barrage est installé sur la rivière du Bronze, affluent rive gauche de l'Arve (l'Arve est la rivière qui draine la vallée de Chamonix). Il est dit mobile car il est équipé d'un clapet (grande vanne) qui régule le débit. Cette solution a pour avantage de pouvoir effacer le barrage en cas de grande crue.

Les objectifs de l'ingénierie étaient multiples : concevoir la centrale au moindre impact environnemental, foncier et financier. Il s'agissait ainsi de trouver l'optimum au niveau de la prise d'eau, de concevoir une conduite forcée qui, en l'occurrence, est entièrement

ÉTUDE DU POTENTIEL DE CENTRALES DE POMPAGE TURBINAGE MARINES AU MAROC



5 © SETEC

ÉNERGIES : DES PÔLES D'EXPERTISE DÉDIÉS

Dans tous les domaines liés à l'énergie et à sa production Setec est structuré en pôles d'expertise et combine les efforts et les activités de l'équipe opérationnelle pour proposer des solutions innovantes et adaptées à la réalisation maîtrisée du projet.

Ce positionnement lui permet d'assurer une continuité dans ses missions depuis la conception jusqu'au suivi de la réalisation et de l'exploitation : programmation, définition des besoins, études générales amont (schémas directeurs, bilans carbone, conseils stratégiques, études de gisements énergétiques), études de faisabilité technique, économique et financière, expertise-diagnostic, assistance aux maîtres d'ouvrage, maîtrise d'œuvre.

enterrée, pour un rendement maximum au moindre impact et d'organiser les travaux en quatre lots pour réduire le coût global du projet.

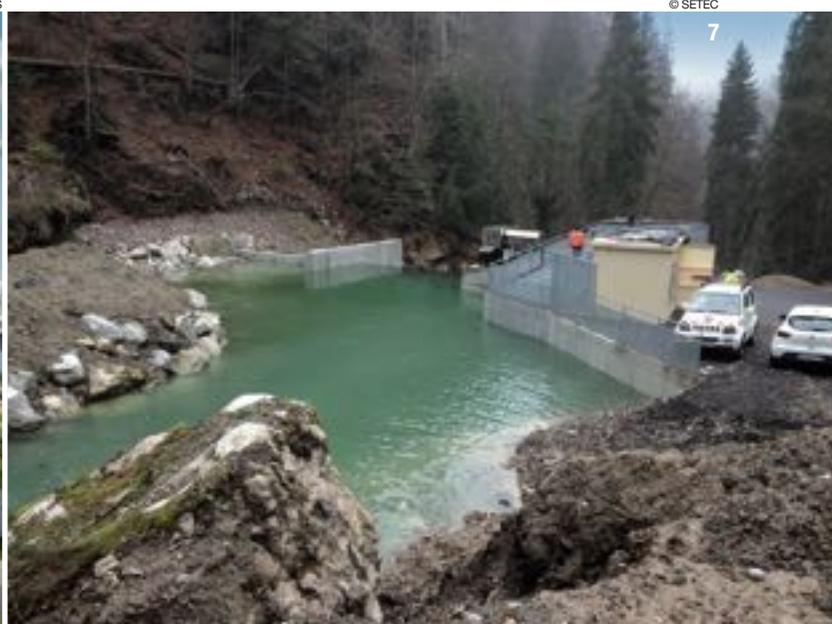
Quelle est l'originalité de l'intervention de Setec en Éthiopie ?

Pour le projet Ashegoda Wind Farm en Éthiopie, il s'agissait de contribuer, sous maîtrise d'ouvrage de Ethiopian Electric Power Corporation et pour le compte de l'EPC Vergnet, à la réalisation d'une ferme de 30 éoliennes (en phase 1) maintenues chacune par 6 haubans pour réduire le volume



© REICHEN ET ROBERTS

6



© SETEC

7

de béton de la fondation de l'embase principale. Les haubans sont ancrés grâce à 300 micropieux de 4 à 21 m de longueur. Outre la fourniture et le montage des éoliennes, ce projet comprend 54 éoliennes supplémentaires en phase 2, ainsi que la réalisation des pistes d'accès aux machines (environ 35 km au total), les réseaux électriques (enterrés et aériens 33 kV) ainsi que la sous-station électrique 33 kV/230 kV qui injecte l'énergie produite sur le réseau de transport national. Setec a réalisé les études géotechniques des fondations des éoliennes, comprenant notamment le dimensionnement statique et cyclique des micropieux d'ancrages pour les haubans des machines, ainsi que le suivi de leur exécution. Les micropieux d'ancrage subissent des efforts de traction variant cycliquement et Setec a donc mis au point une méthode de dimensionnement basée sur la notion de diagramme de stabilité cyclique : cette approche consiste à tracer un domaine de stabilité des sollicitations cycliques dans un plan défini par leur part moyenne en abscisse et leur part cyclique en ordonnée, et à comparer ce domaine, défini à l'aide des propriétés du micropieu et du sol environnant, aux efforts cycliques subis par la fondation.

Par ailleurs, en raison des disparités géologiques mises en évidence lors des reconnaissances géotechniques, un suivi géologique de chacun de forages a été assuré en phase d'exécution afin de reconnaître les épaisseurs des différentes formations traversées.

Les longueurs des micropieux ont ainsi pu être ajustées par rapport au dimensionnement initial.

Pour cette ferme éolienne, Setec a également réalisé les études PRO des pistes d'accès de phase 2.



9
© SETEC

5- Étude du potentiel de centrales de pompage turbinage marines au Maroc.

6- La centrale de valorisation énergétique de Saint-Ouen (architecte Reichen et Robert & Associés).

7- Le barrage mobile de la petite centrale hydro-électrique de Bonneville sur le Bronze.

8- La centrale de Bonneville est conçue pour présenter le moindre impact environnemental.

9- Vue d'ensemble du projet « Ashegoda Wind Farm » en Éthiopie.

10- Détail des éoliennes maintenues par des haubans ancrés sur micropieux.

Le rôle de l'ingénierie a été déterminant pour optimiser le tracé et la géométrie des 20 km de pistes en modélisant les charges qu'elles allaient recevoir pendant la courte durée du chantier, et les dimensionner ainsi au moindre coût pour déplacer le moins de terre possible et apporter moins de matériau.

Les énergies décarbonées peuvent-elles également être compétitives dans le domaine de l'éolien off-shore ?

Dans un tout autre domaine mais également avec l'objectif de rendre les énergies décarbonées compétitives, Setec est intervenue sur les futurs parc éoliens offshore français actuellement en projet. L'une des conditions de leur réalisation est de garantir un impact minime sur la faune marine, ce qui ne peut être constaté qu'à l'aide de suivis, pendant et après leur construction. Pour en diminuer le coût qui peut s'avérer très élevé, Setec a imaginé un

suivi semi-automatisé de la mégafaune - oiseaux et mammifères marins - par le dessus, par avions ou par drones à longue portée. Ce système est mis en service en 2018 pour l'Agence de l'eau Seine-Normandie, dans le cadre du suivi de son territoire maritime incluant les futurs parcs de Courseulles-sur-Mer et de Fécamp.

L'objectif est de permettre un suivi régulier avec des moyens humains et logistiques les plus économes possible. La campagne réalisée lors de la mise au point de ce système a permis de prendre 10 000 photos en trois survols ayant abouti à 2 700 vignettes d'animaux et 14 espèces identifiées.

Le rôle de l'ingénierie a été de mettre au point la combinaison d'outils rapides et automatisés : photos haute définition prises en altitude pour éviter les bateaux, reconnaissance d'objet par interface homme/machine, détection des cibles par un logiciel de *machine learning*⁽¹⁾.

Setec est également très présent dans l'industrie nucléaire. Quelles sont les innovations en cours de développement dans ce secteur ?

Il faut rappeler à ce sujet que la construction initiale d'un réacteur nucléaire compte pour plus de la moitié du coût de l'électricité qu'il produira pendant sa durée de vie - de 40 à 60 ans - et que le génie civil lui-même en représente un quart. Il constitue donc un levier-clé du coût de cette énergie décarbonée. L'enjeu d'aujourd'hui est de ne pas l'augmenter, voire de le diminuer de manière à améliorer, ou tout au moins à ne pas dégrader la compétitivité de cette énergie, déjà très performante, en trouvant des pistes d'économie sur la construction des réacteurs. ▷

© SETEC



8

© SETEC



10

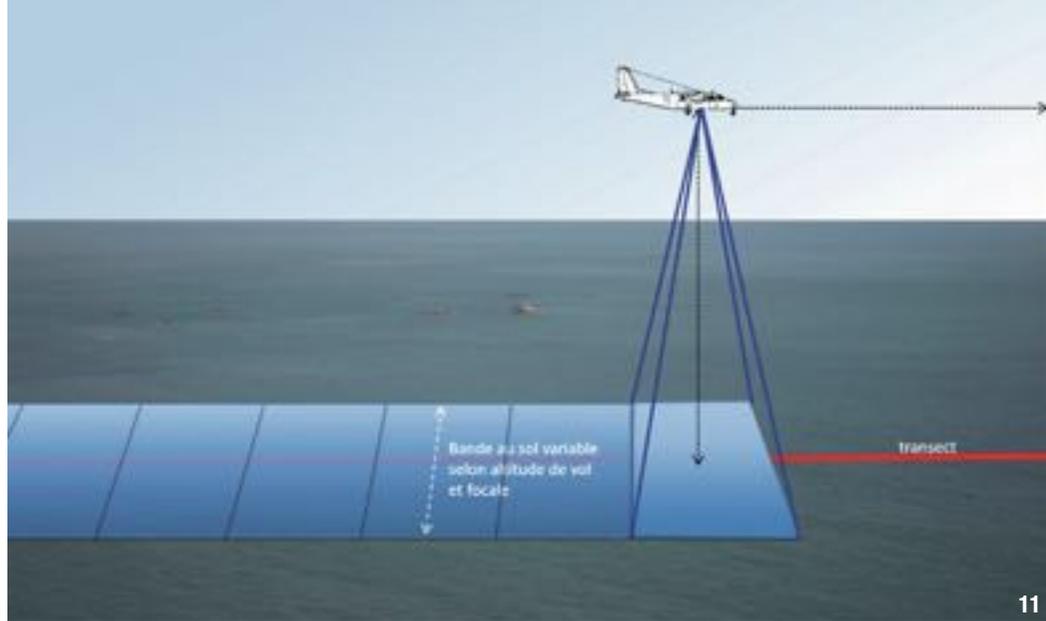
Setec est intervenu et intervient dans la conception et l'exécution du génie civil des centrales nucléaires. Par exemple, nous avons produit les plans d'exécution du réacteur de Flamanville 3 pour le compte du groupement constructeur emmené par Bouygues. Ceci nous a donné un bon retour d'expérience en ce qui concerne les opportunités d'optimisation du génie civil.

C'est ainsi qu'en groupement avec Egis et Tractebel, nous réalisons la conception du génie civil de l'îlot nucléaire du réacteur d'Hinkley Point au Royaume Uni pour le compte d'EDF.

Sur ce projet comme sur d'autres conceptions de génie civil, nous appliquons au maximum la méthode d'ingénierie de la valeur aux principaux leviers du coût par un processus de modélisation itératif. Parmi ces leviers, la structure est optimisée pour minimiser les charges reportées sur les fondations ; les matériaux les plus économiques tout en restant performants sont choisis ; les codes et méthodes les moins pénalisants sont utilisés.

L'innovation qui permet cette itération est l'interconnexion de maquettes 3D de génie civil, de modèles structurels aux éléments finis, d'outils de post-traitement plus performants que nous développons nous-mêmes. Ces outils permettent le calcul des contraintes et des armatures ainsi que des études paramétriques que nous utilisons, par exemple, pour réduire les quantités de ferrailage sur les futurs réacteurs.

L'ingénierie cherche aussi à réduire les délais de construction : sur le projet de Hinkley Point, nous utilisons une maquette 3D du ferrailage - c'est une première - pour résoudre en amont les éventuels conflits entre les armatures et les nombreux inserts qui auraient ralenti le chantier.



11

© SETEC INVIVO

Quels exemples dans votre troisième série d'interventions concernant l'innovation de l'ingénierie par l'introduction de technologies nouvelles dans les installations existantes et les projets énergétiques ?

Le premier concerne Advizeo by Setec, une application clé en main démocratisant le management de l'énergie des experts, développée par une start-up interne au groupe.

Il s'agit d'un service innovant pour optimiser l'exploitation-maintenance et ainsi faire des économies d'énergie, jusqu'à 25 % de la facture. Chaque bâtiment ou infrastructure, quels que soient sa taille et son secteur d'activité,

devient communicant en moins de 30 minutes grâce à l'Internet des objets. Dans la pratique, Advizeo by Setec comprend des objets connectés pour télélever en temps réel les données énergétiques (électricité, gaz, eau) et les données liées au confort (température, CO₂, humidité). Elles sont visualisables dans une application, disponible sur ordinateur et smartphone. Grâce au traitement Big Data, aux algorithmes de data science, les données sont traitées et analysées afin d'envoyer aux utilisateurs des recommandations personnalisées et des alertes (fuite d'eau, utilisation de l'électricité pendant la nuit, hausse de la température, etc.) pour mieux gérer leurs bâtiments.

Enfin, les utilisateurs peuvent bénéficier d'un accompagnement spécifique par des Energy Managers pour déployer un plan d'actions d'amélioration et faire des économies d'énergie.

Dans ce dispositif, l'ingénierie apporte son expertise en matière d'efficacité énergétique, d'exploitation et de maintenance des bâtiments ainsi que dans le domaine des objets connectés, les données étant évidemment sécurisées via un cloud. L'innovation consiste ici à mettre ces deux expertises à disposition des usagers de façon continue et automatisée.

L'autre exemple d'innovation au service de la transition énergétique est relatif aux stations de pompage-turbinage marines (SPT marines) qui peuvent assurer un stockage économique d'énergie pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables.

En effet, le gros problème du passage à des énergies décarbonées, de préférence renouvelables, est qu'elles sont, exception faite de l'énergie hydraulique et du nucléaire, intermittentes.

Le stockage d'énergie par pompage-turbinage d'eau entre un réservoir haut et un réservoir bas, a un coût deux fois moins élevé que celui du stockage en batterie et son rendement est de 80 %. Cette technologie est déjà utilisée, notamment en France, dans sept

NUCLÉAIRE : DE LA CONCEPTION AU DÉMANTÈLEMENT

Du management de projet au génie civil, à la géotechnique et au génie parasismique, en passant par l'hydraulique, le traitement de l'eau, sa chimie et ses réactifs, la mécanique, les matériaux et le diagnostic des ouvrages, Setec dispose de compétences très complémentaires. Aujourd'hui, la capitalisation de ces expériences pluridisciplinaires lui permet de se positionner sur des projets d'ingénierie complexe dans le nucléaire, afin d'accompagner ses clients sur les phases de requalification, de constructions neuves, d'études de nouveaux modèles, de projets de démantèlement et de stockage des déchets.

© A.CHEVALLIER

12



© A.CHEVALLIER

13





14 © SETEC

centrales mais ses capacités sont limitées par la disponibilité des reliefs utilisables : il est nécessaire d'avoir des vallées et des montagnes aménageables. Pour contourner ce problème, Setec s'est engagé dans le développement de stations de pompage-turbinage marines, dont le réservoir bas est la mer. Ce procédé est actuellement très peu déployé dans le monde : il n'existe à ce jour qu'une seule exploitation de ce type en service, à Okinawa Yanbaru, au Japon.

En revanche, nous avons dans ce domaine une expertise que nous mettons au service des exploitants depuis déjà un certain temps pour faire des évaluations.

Nous participons à des projets de développement et, notamment, en 2017, nous avons réalisé, pour le compte de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit⁽²⁾, une évaluation de l'ensemble du littoral marocain pour son potentiel en matière de stations de pompage-turbinage marines.

Le Maroc est l'un des pays qui a le programme de développement d'énergies

11- Zone de recouvrement de l'avion de survol de la zone suivie par l'Agence de l'eau Seine-Normandie.

12- Un fou de Bassan suivi dans le territoire maritime de l'Agence de l'eau Seine-Normandie.

13- Des grands dauphins au large de Courseulles-sur-Mer ou de Fécamp.

14- Principe de fonctionnement de l'application Advizeo by Setec.

15- Le réacteur de Flamanville 3 dans la Manche.

16- Le site de l'installation de pompage turbinage marine d'Okinawa Yanbaru au Japon.

renouvelables intermittentes le plus ambitieux. À l'issue de cette opération, Setec a identifié un potentiel théorique de 32 GW de capacité de stockage à partir de sites marins.

Notre rôle en la matière, en tant que société d'ingénierie, consiste à faire les choix techniques qui maximisent le potentiel de chaque site : étudier leur topologie pour modéliser les capacités et la hauteur de chute, contribuer à l'adaptation des pompes et des turbines dans une large gamme de puissance en fonction des besoins du réseau, avec des équipements de pointe comme les variateurs de vitesse des pompes et des turbines, choisir les matériaux et la configuration compatible avec l'eau de mer qui est corrosive.

Pour se projeter vers l'avenir, quelle est chez Setec l'innovation dont le développement pourrait déboucher rapidement sur des réalisations ?

Le dernier exemple d'innovation en cours, qui n'a pas encore été appliqué sur des projets mais qui représente

l'avenir est le BIM 6D, c'est-à-dire le BIM 3D classique mais augmenté des paramètres du bilan carbone des matériaux.

Généralement, plus un matériau est performant structurellement, plus il est non seulement cher mais défavorable pour le bilan carbone : il faut donc trouver le bon compromis et maximiser sa réutilisation. Là, le rôle de l'ingénierie est important car il permet de faire déboucher l'utilisation du BIM 6D sur plusieurs perspectives : comparer les bilans carbone et les performances structurelles pour différents mix de matériaux et prendre juste ce qu'il faut de coefficients sécuritaires dans les calculs ; anticiper la fin de vie des bâtiments en améliorant leur Analyse de Cycle de Vie via le réemploi ; optimiser la déconstruction pour réutilisation sans aucune transformation des matériaux (moins consommatrice d'énergie que le recyclage) via le modèle géométrique 3D ; prévoir dès la conception la traçabilité des matériaux pour leur réutilisation.

Setec contribue actuellement à une thèse sur ce sujet avec l'École Nationale des Ponts & Chaussées et le laboratoire Navier.

Pour conclure, nous essayons d'être créatifs, d'être astucieux, d'attirer des collaborateurs apportant de nouveaux regards, mais aussi d'utiliser toutes les nouvelles technologies disponibles et de les mettre en pratique dans le cadre de nos prestations d'ingénierie. □

1- Le terme de « machine learning » décrit un processus de fonctionnement d'un système d'intelligence artificielle par lequel le système est doté d'un système d'apprentissage.

2- La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH est l'agence qui travaille dans la coopération internationale pour le développement durable.

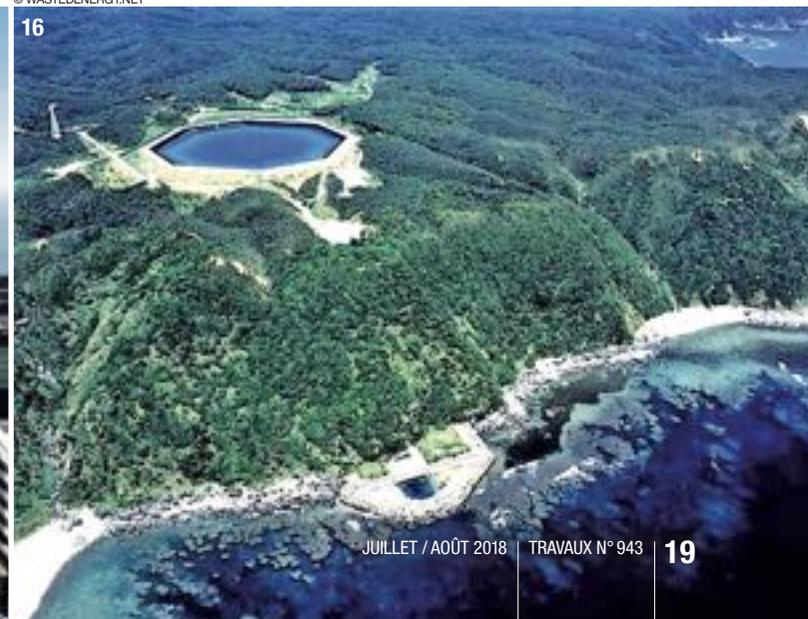
© SETEC

15



© WASTEDENERGY.NET

16



CATHIE ASSOCIATES

DE LA MER

À LA TERRE

TOUTES LES FACETTES DE LA GÉOTECHNIQUE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

UN ENGAGEMENT TOTAL DANS SON SECTEUR AVEC UNE EXPÉRIENCE DE LONGUE DATE DANS LE DOMAINE DES GÉOSCIENCES EN OFFSHORE/ONSHORE, PORTUAIRE/CÔTIER ET TERRESTRE DURANT LE CYCLE COMPLET D'UN PROJET, TELLES SONT QUELQUES-UNES DES CARACTÉRISTIQUES DE CETTE ENTREPRISE À L'ACTIVITÉ PARTICULIÈREMENT DIVERSIFIÉE DONT L'UNE DES AMBITIONS, OUTRE LE FAIT QU'ELLE EST TOTALEMENT IMPLIQUÉE DANS LES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN MER, EST DE PARTICIPER À LA CONSTRUCTION DU GRAND PARIS. EMILIO NICOLINI, GÉRANT ET DIRECTEUR DE L'INGÉNIERIE DE CATHIE ASSOCIATES FRANCE ET CATHIE ASSOCIATES ITALIE, NOUS EXPLIQUE COMMENT IL ENTEND Y PARVENIR EN S'APPUYANT SUR L'ENGAGEMENT DE SON ENTREPRISE DANS UNE INGÉNIERIE STRUCTURÉE ET À VALEUR AJOUTÉE.

Cathie Associates est une société d'ingénierie géotechnique et géophysique créée en 2005 à Bruxelles par David Cathie, expert en géotechnique marine offshore. L'entreprise intervient dans le domaine de l'industrie pétrolière et des énergies renouvelables et récemment dans trois spécialités liées à cette activité :

- L'étude géotechnique des fondations type mono-pieux et gravitaires pour les éoliennes posées en mer dans la craie ;
- L'étude géotechnique pour la sélection des ancrages marins pour des éoliennes flottantes en France ;

→ L'étude géotechnique de détermination de la capacité portante des ancrages dites à succion utilisées dans l'ancrage des plateformes flottantes pour l'industrie du pétrole en présence d'érosion du sol.

Cathie Associates et ses filiales à l'international emploient actuellement une cinquantaine de personnes dont 40 ingénieurs (géotechnique, géophysique et géologie) et réalisent un chiffre d'affaires de l'ordre de 6,5 millions d'euros.

Emilio Nicolini est gérant et directeur de l'ingénierie de Cathie Associates France et Italie.

Il a rejoint l'entreprise en 2012 à la demande de David Cathie et de Martin Hammann (qui a quitté le groupe en 2016) pour en développer la filiale française, basée à Nanterre et la filiale italienne, basée au nord de Milan.

Le groupe comprend également G-Octopus, entreprise de travaux chargée de réaliser l'instrumentation de battage de pieux et d'essais de chargement dynamique et statique, en particulier en milieu marin, qui constitue ainsi le « bras opérationnel » de la filiale française sur le terrain. Ses équipes permettent aux opérateurs de garantir la qualité de construction,

d'assurer les délais de chantier et de maîtriser les coûts.

Le groupe dispose aussi d'une filiale en Grande Bretagne (Newcastle et Londres) depuis 2010, en Allemagne (Hambourg) depuis 2012 ainsi que d'une tête de pont aux États-Unis, à Houston (Texas) pour le pétrole et Boston (Massachusetts) pour les énergies renouvelables, ouverte en 2017. Elle étudie actuellement une implantation supplémentaire à Taiwan.

DE L'ÉOLIEN OFFSHORE...

Quasiment dès l'origine de la société, en 2008, forts de leurs compétences

de plus de 20 ans dans la géotechnique marine pétrolière, David Cathie et son équipe se sont orientés vers les énergies renouvelables marines, tout particulièrement l'éolien offshore posé.

Dès la conception des projets et sur le chantier, Cathie Associates intervient pour optimiser les méthodes de construction des éoliennes offshore. Son champ d'intervention couvre tous les besoins en géotechnique et projets des fondations comme la supervision d'installation des fondations (forage, battage de pieux, préparation de remblais pour bases gravitaires...) et le conseil à l'installation des câbles sous-marins.

« *L'éolien offshore posé ou flottant, précise Emilio Nicolini, requiert des compétences industrielles et géotechniques similaires à celles requises pour les plateformes pétrolières offshore : l'ouverture à cette activité semblait logique, compte tenu de sa complémentarité* ». Un point important à souligner concerne le poids économique d'une fondation dans l'économie d'un projet éolien offshore.

Dans le domaine de l'éolien, il atteint entre 20 et 30% du coût total de la structure, ne serait-ce que par la nécessité de transporter la fondation proprement dite depuis son lieu de fabrication jusqu'à son site d'implantation en mer. De ce fait, le coût de la fondation proprement dite est relativement significatif.

En effet, l'industrie de l'éolien offshore s'est orientée entre autres vers la technologie dite des "mono-pieux" avec des structures très importantes : des pieux ouverts battus de 5 à 8 m de diamètre et 20 à 30 m de pénétration dans le sol marin.

« *La mise en œuvre de telles structures requiert des compétences en monitoring en temps réel de l'exécution des travaux dont Cathie Associates s'est fait une spécialité au travers de sa filiale G-Octopus, ajoute Emilio Nicolini. Il faut savoir que de telles opérations se déroulent dans des conditions très particulières : outre le fait que le milieu marin peut s'avérer "hostile" pour le navire sur site et son équipage, les mesures sont effectuées 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24 pendant toute la durée du battage. Par ailleurs, elles ne peuvent se faire que pendant le battage, qu'il est évidemment impossible d'interrompre ou de différer tant pour des raisons techniques qu'économiques, quel que soit l'état du milieu marin* ».

© DR



EMILIO NICOLINI : PARCOURS EN BREF

Emilio Nicolini est titulaire d'un doctorat en géotechnique de Politecnico di Milano (École Polytechnique de Milan) obtenu en 1998. Spécialisée dans les sciences, la technologie et le design industriel, Politecnico di Milano est considérée comme l'une des écoles d'ingénieurs italiennes parmi les plus élitistes.

Il commence sa carrière d'ingénieur et devient ensuite l'un des directeurs techniques de l'entreprise italienne Soil. Les projets auxquels il est associé relèvent du domaine routier et autoroutier mais aussi portuaire et offshore avec notamment les fondations d'ouvrages d'art et de digues.

Il rejoint Cathie Associates en 2012 en tant qu'expert géotechnique avec la mission de créer un team de spécialistes des problèmes géotechniques dans le cadre d'un développement à l'international avec des filiales et des ingénieurs basés dans le pays où ils exercent leur activité.

Emilio Nicolini est directeur de l'ingénierie de Cathie Associates France et Cathie Associates Italie depuis 2012 et gérant depuis 2016.

Outre le fait de poursuivre les activités de Cathie Associates dans le domaine de la géotechnique marine et offshore, en particulier de l'éolien offshore, l'une de ses ambitions est d'obtenir la reconnaissance des entreprises dans la géotechnique terrestre, en s'appuyant sur ses compétences propres et son expérience de plus de 20 ans ainsi que sur celles de son équipe.

Son espoir rejoint d'ailleurs celui de la plupart des géotechniciens : que cette spécialité cesse d'être considérée comme un mal nécessaire.

1- Emilio Nicolini gérant et directeur de l'ingénierie de Cathie Associates France et Cathie Associates Italie.

Dans le domaine des énergies renouvelables marines, la filiale française est très largement impliquée dans l'ensemble des projets en cours tant en mer du Nord que dans la Manche ou dans l'océan Atlantique, qu'il s'agisse d'éoliennes posées, dont les champs d'implantation sont déjà définis ou

d'éoliennes flottantes, dont le développement n'en est actuellement qu'à la phase de recherche de faisabilité au travers de démonstrateurs.

L'un des objectifs de Cathie Associates est de s'impliquer également dans les hydroliennes, c'est-à-dire des équipements posés sur le fond marin, dont plusieurs projets sont, là encore, en cours de développement : les hydroliennes convertissent l'énergie cinétique des courants marins en électricité, comme le font les éoliennes avec le vent. Un projet en ce sens vient d'être terminé avec succès, qui vise à améliorer la prévision du comportement d'une fondation innovante, dite "pin", capable de développer une force d'ancrage sur la roche vive grâce au poids propre de l'hydrolienne elle-même.

...À LA GÉOTECHNIQUE ONSHORE...

Enfin, bien qu'elle ne soit pas encore très connue dans les activités "à terre", l'une d'une des ambitions d'Emilio Nicolini est de faire participer Cathie Associates à quelques-uns des chantiers du Grand Paris, où les besoins en compétences dans les domaines de la géotechnique et de la géophysique sont, à l'évidence, considérables.

Cathie Associates dispose déjà de références dans les réalisations "onshore" : par exemple, le dimensionnement des fondations sous dallage d'une usine de stockage à Ferrare, en Italie, dans des sols argileux sensible aux tassements différentiels. La solution préconisée prévoyait des inclusions rigides sous la forme de pieux non connectés à la dalle (qui est d'environ 20 m x 50 m en plan), afin de réduire les tassements de la manière la plus économique possible. Autre exemple : à Soacha, en Colombie, pour Saint Gobain, le dimensionnement des fondations d'une usine sur des sols très hétérogènes avec une solution mixte associant pieux longs ancrés dans la roche et pieux courts flottants. L'une des références de Cathie Associates dans l'ingénierie préliminaire demeure à ce jour le projet gazier de Yamal, en Sibérie occidentale, mené par Vinci Construction Grands Projets. Lancé fin 2013, Yamal LNG piloté par Total est l'un des projets de GNL parmi les plus grands et les plus complexes au monde.

À 400 kilomètres au-delà du cercle polaire, la péninsule de Yamal est située dans l'estuaire de l'Ob, une région sauvage enclavée et gelée 7 à 9 mois par an, où la température, en hiver, peut chuter jusqu'à -50°C.

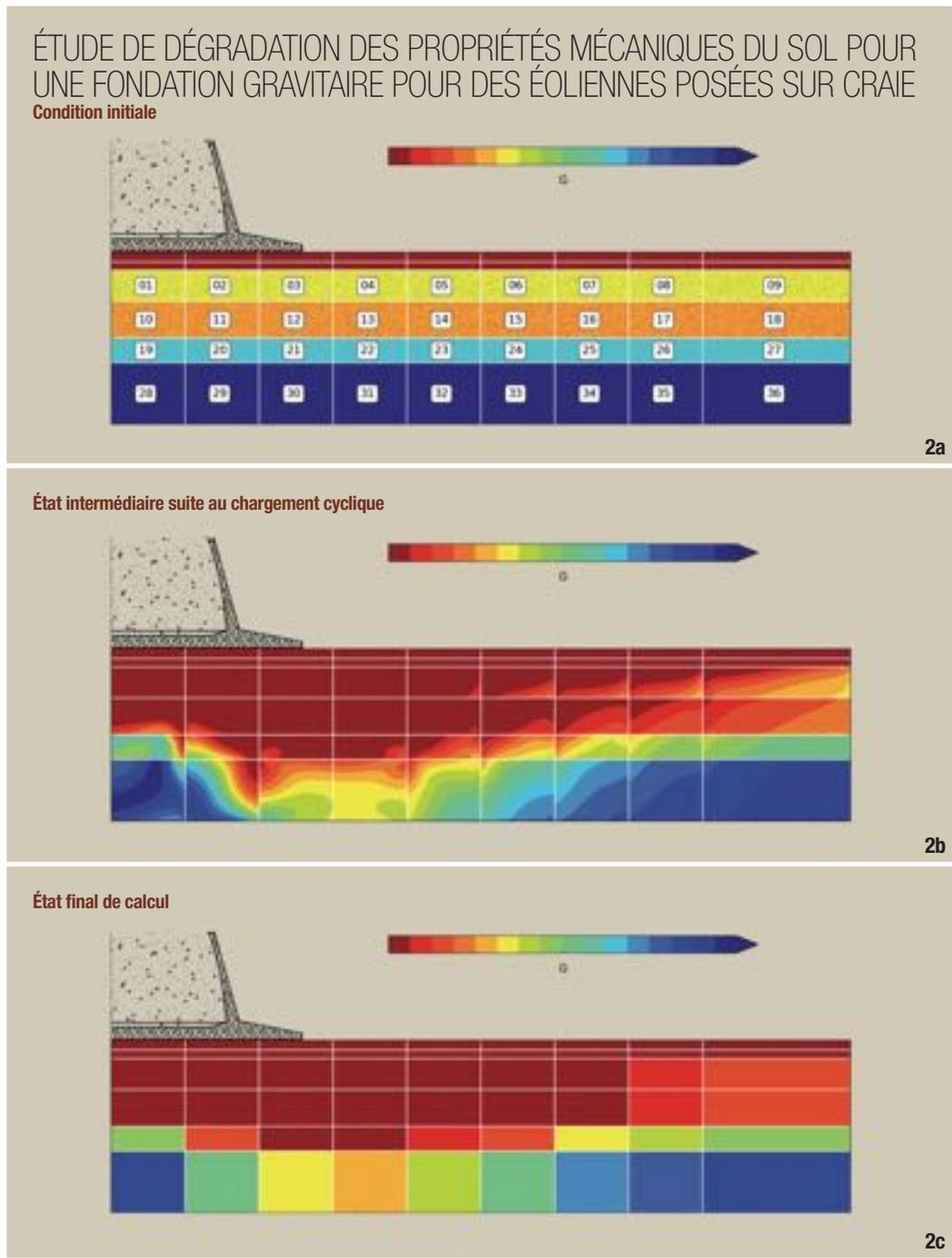
« C'est dans cette région que se situe le projet Yamal LNG, indique Emilio Nicolini. Il s'agissait de concevoir, de fournir des équipements, d'approvisionner, de construire et d'équiper 4 réservoirs cryogéniques en béton à double paroi pour le stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) d'une capacité unitaire de 160 000 m³. Une approche innovante du projet a permis de limiter le coût des fondations en réduisant le nombre des pieux dans le sol très atypique qu'est le permafrost ».

La maîtrise de l'ingénierie des fondations a été un critère déterminant pour permettre à Vinci Construction Grands Projets de remporter le marché.

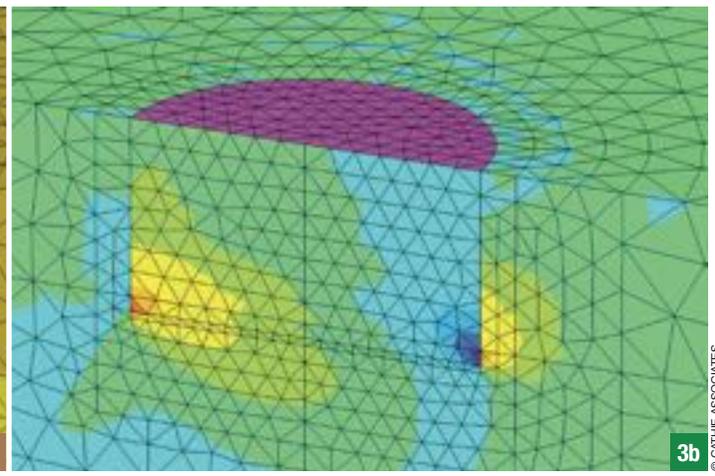
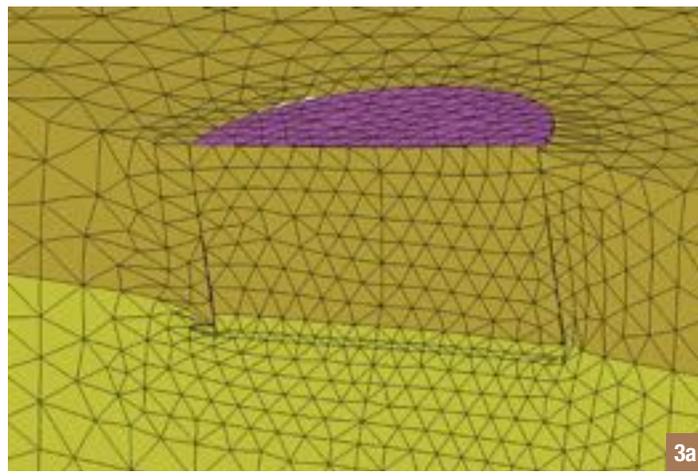
Le deuxième point important de ce projet concerne la capacité technique

2a, 2b & 2c- Étude de dégradation des propriétés mécaniques du sol pour une fondation gravitaire pour des éoliennes posées sur craie :
 "a" condition initiale ; "b" état intermédiaire suite au chargement cyclique ; "c" état final de calcul.

3a & 3b- Étude de fondation d'ancrage - Modélisation aux éléments finis : à gauche, déplacement, à droite, pression interstitielle de l'eau.



© CATHIE ASSOCIATES



© CATHIE ASSOCIATES



4



6



5



7

© CATHIE ASSOCIATES

© CATHIE ASSOCIATES

© CATHIE ASSOCIATES

© CATHIE ASSOCIATES

4- Battage de monopieu en Europe du nord : détail d'un monopieu en horizontal au port, en attente d'être chargé sur le bateau d'installation.

5- Jacket et pieux sur le cargo-barge en attente de l'installation ; structure d'un poste de transformation électrique d'un champ éolien.

6- Monopieu en cours d'installation avec, en partie supérieure de l'image, l'instrumentation pour le suivi du battage.

7- Instruments pour les tests dynamiques sur pieux.

à réaliser un chantier dans des conditions extrêmes.

Pour réaliser les pieux, le forage dans le permafrost est une opération délicate car la perturbation de l'équilibre naturel des conditions de sol peut provoquer un réchauffement du sous-sol et, à terme, menacer la stabilité des fondations. Pour surmonter cette difficulté, Vinci a

mis en œuvre une solution de thermo-stabilisation, complétée par un système de compensation des dilatations thermiques de l'ouvrage.

Le réservoir est donc posé à 2 m au-dessus du sol, pour permettre le passage de l'air froid. Le dispositif permet de ne pas perturber l'équilibre thermique.

En supplément, il a été posé entre chaque pieu un thermo-stabilisateur de plusieurs mètres de long qui maintient le permafrost à une température inférieure à celle de dégel pendant la vie de l'ouvrage.

En 2018, l'entreprise a gagné la confiance de Systra qui a fait appel à Cathie Associates pour les études pré-alables relatives à plusieurs systèmes de transport à l'international - tramways et trains à grande vitesse - tandis que Total demeure un client historique au travers de son département TEC/GEO pour des réalisations pétrolières et gazières en mer, mais aussi, à terre, qu'il s'agisse de terminaux d'accostage et de chargement de tankers ou d'ouvrages terrestres.

ACTIVITÉ OFFSHORE

Dans le domaine maritime, Cathie Associates propose des solutions sûres et économiques :

- Études des aléas géotechniques de sites,
- Dimensionnement des fondations de plateformes offshore (jackets) ou de tours éoliennes (sur mono-pieu),
- Fondations temporaires des navires d'installation type " jack-up ",
- Instrumentation de pieux battus,
- Risques opérationnels (maintenance, inspection, réparation),
- Routes de câbles (étude et analyse des risques d'affouillement),
- Assistance à la construction du modèle de sol par Intégration et interprétation des données de sol et suivi des investigations sur site.

UN CHAMP PÉTROLIER EN EUROPE

Un opérateur pétrolier, par exemple, a fait appel à Cathie Associates pour suivre les activités d'implantation liés à la géotechnique de son champ pétrolier terrestre dans un pays du sud de l'Europe. ▷

Le projet comprend la construction d'un centre de production et de traitement des hydrocarbures, un centre de stockage de GPL et le raccordement à un oléoduc qui transportera le brut jusqu'à la raffinerie locale, d'où il sera exporté.

Dans ce but, les capacités de l'oléoduc ainsi que des ouvrages de stockage et du terminal portuaire de la raffinerie seront augmentées. Le champ est situé en altitude, alors que le gisement se trouve à plus de 4 000 m de profondeur et sera mis en production avec plusieurs puits.

« L'expertise de Cathie Associates, poursuit Emilio Nicolini, concernait la supervision des sondages, la définition du modèle géotechnique, les analyses de stabilité sous conditions statiques et sismiques, l'analyse des tassements et des déplacements latéraux du mur de soutènement, l'étude des systèmes de suivi et d'instrumentation, l'analyse des glissements, le contrôle des tassements ».

GÉOTECHNIQUE ET GÉOLOGIE PORTUAIRE

Dans le domaine portuaire, une participation remarquable de Cathie Associates est celle au projet de raffinerie Soca & Turcas réalisé par Saipem, en Turquie.

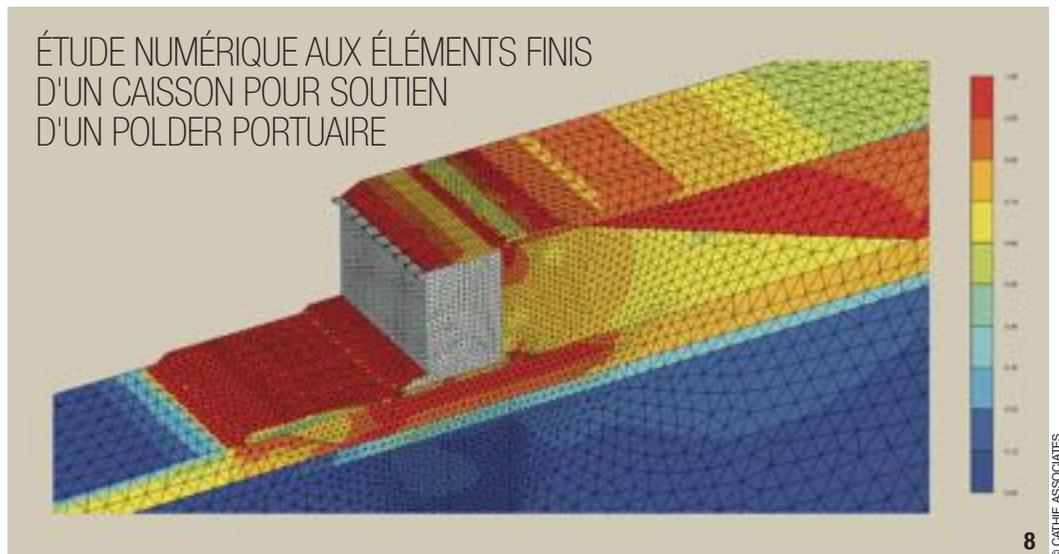
Il s'agissait de calculer les efforts sous séisme dans les fondations d'une jetée et d'une digue.

Cathie Associates a réalisé des analyses numériques dynamiques pour vérifier la stabilité de la digue et calculer les efforts dans les pieux de fondation des portiques à conteneurs.

Sur les chantiers d'extension des ports de Brest et de Calais, l'entreprise a réalisé la synthèse et la définition du modèle géotechnique le long des digues ainsi que les calculs de stabilité générale, les analyses de liquéfaction et le renforcement des plates-formes Ro-Ro.

Pour le terminal du Cap Lopez, situé à la pointe de l'île Mandji, dans le delta de l'Ogooué, au Gabon, où il s'agissait d'assurer la protection du littoral, Cathie Associates a supervisé les investigations et effectué les calculs de stabilité générale incluant la liquéfaction statique (flow slide) ainsi que le prédimensionnement de solutions de type double paroi de palplanches et gabions circulaires.

Pour en terminer avec ces quelques exemples d'interventions dans le domaine portuaire, sur le port d'Arzew, en Algérie, où il convenait de construire



8

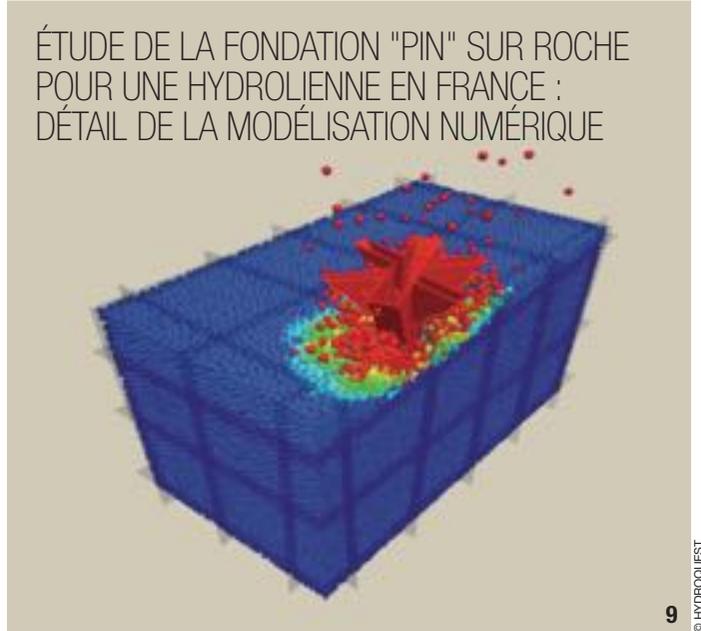
© CATHIE ASSOCIATES

ÉTUDE DE LA FONDATION "PIN" SUR ROCHE POUR UNE HYDROLIENNE EN FRANCE : DÉTAIL DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

8- Étude numérique aux éléments finis d'un caisson pour soutien d'un polder portuaire.

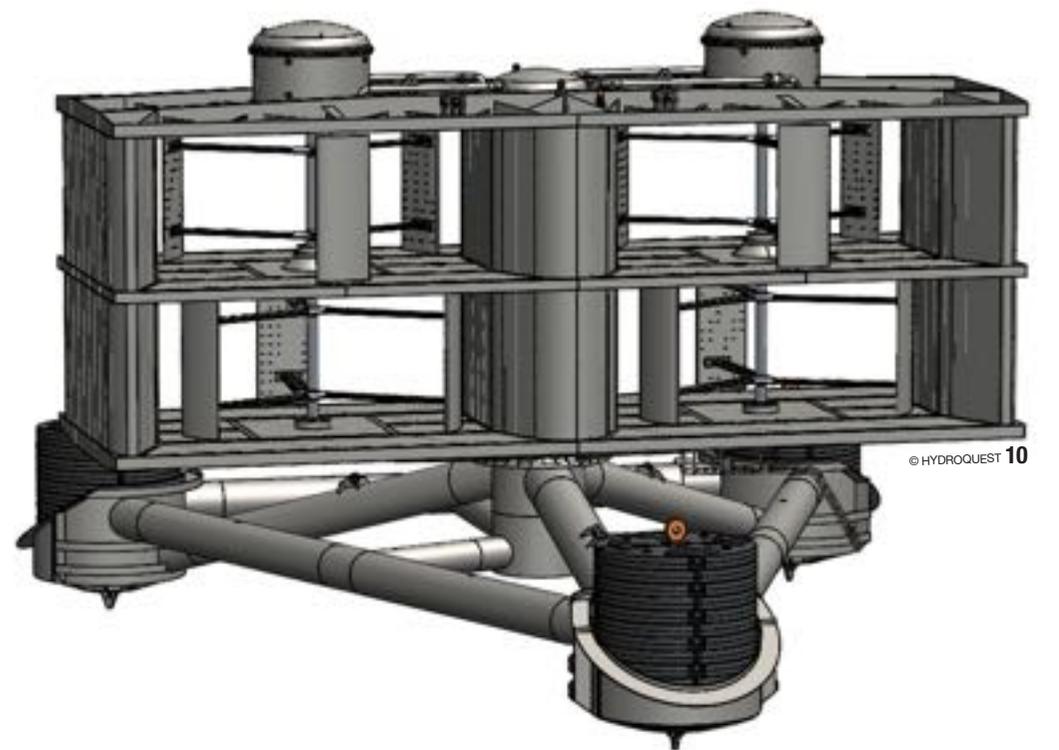
9- Étude de la fondation "pin" sur roche pour une hydrolienne en France : détail de la modélisation numérique.

10- Vue d'ensemble de l'hydrolienne.



9

© HYDROQUEST



© HYDROQUEST 10



© CATHIE ASSOCIATES

11



© EUROFORM

12



© MEZZADRINGERIA S.R.L.

13



© MEZZADRINGERIA S.R.L.

14

11- Chantier pétrolier dans le sud de l'Italie (ouvrages géotechniques).

12- Structures pour bétonnage de tunnels en Italie calculées par Cathie Associates.

13- Exécution d'une dalle sur inclusions rigides à Ferrare, en Italie, pour Mezzadringeria s.r.l.

14- Vue d'ensemble d'une dalle sur inclusions rigides avant bétonnage pour Mezzadringeria s.r.l.

1,5 kilomètres de jetée, elle est intervenue pour la prédiction de battage des pieux, leur instrumentation pendant le battage avec des essais de chargement dynamique et latéral statique et l'interprétation des données.

INTÉGRER LA GÉOPHYSIQUE MARINE ET TERRESTRE

« L'activité géophysique de Cathie Associates, précise Emilio Nicolini, nous a permis de gagner récemment plusieurs contrats importants dans le domaine des

câbles sous-marins qui accompagnent la quasi-totalité des réalisations pétrolières et gazières et auxquels s'ajoutent désormais, avec le développement de l'éolien posé en mer, l'ensemble des problèmes de la connectique de transport de puissance entre chacune des éoliennes, la sous-station électrique en mer et les câbles d'atterrissage jusqu'à la centrale électrique de distribution de l'énergie à terre, toutes activités nouvelles qui relèvent de notre domaine ».

ACTIVITÉ PORTUAIRE / TERRESTRE

Les études portuaires et terrestres que réalise Cathie Associates concernent l'ensemble des interventions destinées à réaliser les infrastructures correspondantes :

- Consolidation et renforcement de sols de polder (terrains gagnés sur la mer),
- Pieux battus de jetée et ducs d'Albe, (avec essais de chargement statique ou dynamique de pieux),
- Stabilité générale des digues et des caissons,
- Dimensionnement de fondation profonde,
- Stabilité de paroi de soutènement de quais.

INGÉNIERIE MARINE : L'ÉOLIEN DE DEMAIN

Il y a aujourd'hui un besoin, en particulier en Europe, de créer des systèmes pour gérer la distribution de l'électricité à travers l'amélioration de la connexion entre les réseaux électriques des différents états : France et Espagne, France et Grande-Bretagne, France et Pays-Bas, France et Allemagne... ▷

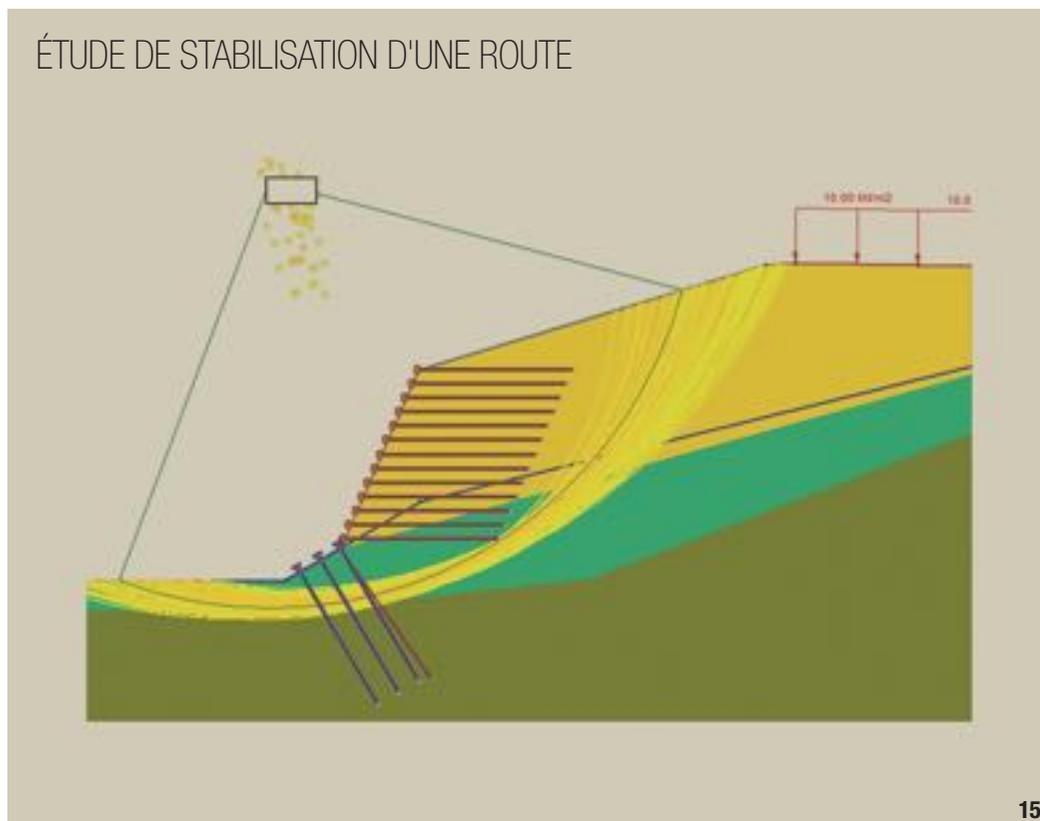
Ces connexions sont assurées par des câbles de très grande puissance, dits "interconnectors".

« Cathie Associates travaille actuellement sur l'un d'entre eux, indique Emilio Nicolini, qui sera mis en place dans le golfe de Biscaye, dans la mer Cantabrique, au sud du golfe de Gascogne, entre l'Espagne et la France. Cette liaison aura notamment en charge la gestion des besoins électriques réciproques de chacun de ces deux pays, mais il en est de même pour la plupart des autres pays européens limitrophes de la France ».

Dans le domaine marin, la géotechnique et la géophysique tiennent une place prépondérante car elles permettent de dresser non seulement un tableau du fond marin mais aussi de la structure globale du sous-sol. Dans le golfe de Biscaye en particulier, elles ont permis de mieux mettre en évidence la géométrie de plusieurs canyons importants dont le franchissement sera probablement nécessaire. À cela s'ajoutera un autre élément, lié à l'intermittence de fonctionnement des éoliennes marines : le stockage de l'électricité. Il n'en est encore qu'à ses balbutiements mais devrait ouvrir de nouveaux marchés aux entreprises chargées de construire les infrastructures destinées à le résoudre, quelle qu'en soit la nature et par là même à celles spécialisées dans la géotechnique et la géophysique.

DE LA FAISABILITÉ À LA CONSTRUCTION

Un examen horizontal des activités de l'entreprise fait apparaître que Cathie



Associates est en mesure d'accompagner ses clients dans toutes les étapes de la réalisation d'un projet, depuis sa faisabilité jusqu'à sa construction en passant par son ingénierie et sa validation (réglementaire notamment). Pour le terrestre et pour le marin, la faisabilité est assurée par des études de site avec identification des risques géologiques associés et la proposition de solutions géotechniques. Cette collecte

15- Étude de stabilisation d'une route.

16- Alexandre Crochelet, responsable des opérations chez G.Octopus.

17- José Munoz, chef de projet en géotechnique.

comprend l'ensemble des données disponibles sur SIG (géo-database) : géologiques, géophysiques et géotechniques (bathymétrie, pentes, géohazards...) mais aussi anthropologiques (trafic marin, pêche, zone de restriction) et météorologiques (vent, houle, température, courant...) en incluant la prise en compte de l'environnement (espèces protégées, zones restrictives). Pour l'ingénierie, plusieurs éléments



sont mis en évidence : définition, suivi et interprétation des investigations, construction du modèle de sol avec intégration géophysique et géotechniques, dimensionnement géotechnique des fondations.

La phase de validation consiste en un accompagnement du client tout au long de la phase réglementaire, incluant le coût final de l'opération.

Au stade de la construction, Cathie Associates assure le management du projet avec des interventions liées à la nature des travaux : installation des pieux, affouillement des câbles et des conduites, mise en place des jack-ups ou des rigs de forage, suivi de la construction des ouvrages à terre.

Cet ensemble de compétences, tant sur l'eau qu'à terre, lui permet de travailler pour des clients reconnus comme des acteurs influents chacun dans leur domaine. Pour n'en citer que quelques-uns : Total, Statoil et Shell dans l'industrie pétrolière et gazière, Technip, Eni-Saipem, Subsea 7, dans celui des "contractors", EDF Énergies Nouvelles, Dong Energy et Vattenfall dans celui des énergies renouvelables,

LE PROGRAMME CITEPH EN BREF

CITEPH facilite l'accès à des financements privés de projets de recherche innovants dans le domaine des énergies. Il contribue à une vision partagée de l'évolution des technologies dans ce domaine industriel porteur et à un partage du risque financier de la R&D.

Il aide les PME innovantes dans la conduite de projets à finalité industrielle et favorise les relations entre porteurs de projets et sponsors.

Ce programme mène une action volontariste de concertation et d'aide au développement de projets de recherche sur les énergies. Le financement du CITEPH couvre 50% des dépenses du projet. Ce financement est non remboursable, mais des contreparties sont consenties aux sponsors financeurs lors de la commercialisation.

Il contribue activement à la pérennité de ce secteur industriel en France. Dans le cadre de CITEPH, Cathie Associates a présenté plusieurs projets dont l'un d'entre eux a déjà été reconnu. Il s'agit d'une étude numérique relative à l'endommagement des pointes de pieux, se situant précisément à cheval entre l'industrie des fondations pétrolières et de l'éolien offshore.

Vinci, Bouygues, Systra dans celui des maîtres d'œuvre, auxquels s'ajoutent les spécialistes de la pose de câbles et de pipelines ainsi que les opérateurs de terminaux portuaires tels que Jan de Nul et Artelia.

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT : DES SOLUTIONS SPÉCIFIQUES

La diversité des chantiers auxquels elle est associée lui a permis de développer des compétences très originales dans plusieurs domaines liés aux fondations

d'ouvrages posés sur le fond marin ou ancrés à terre : ancres modulables, dimensionnement de GBS sous chargement cyclique, base gravitaire sur la craie pour un parc hydrolien, comportement des pipelines. Ces recherches ont abouti à la mise au point de logiciels spécifiques concernant, par exemple, le dimensionnement de caissons de fondations d'ouvrages dans l'argile (CAISSON) ou l'analyse du comportement de pieux isolés sous chargement axiaux et latéraux, incluant la résistance au battage des pieux (OPILE) ou encore le calcul automatisé de la stabilité des jambes des navires type "jack-up" (JACA).

L'un des développements en cours le plus récent est une participation au programme CITEPH (Concertation pour l'Innovation Technologique dans l'Exploration Production des Hydrocarbures) pour lequel l'un des projets présentés par Cathie Associates a été retenu (voir encadré ci-contre).

Une reconnaissance qui constitue un aboutissement dans sa démarche d'intégration encore plus affirmée dans l'univers de la géotechnique marine et terrestre en France. □




Membre du Réseau Compétit 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 :

<p>Par courrier : 31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09</p> <p>Par Internet : www.cnetp.fr</p> <p>Par mail : sur www.cnetp.fr, lien nous contacter</p>	<p>Par téléphone :</p> <p>pour les entreprises : 01.70.38.07.70 pour les salariés : 01.70.38.07.77</p> <p>Serveur vocal (24h/24) : 01.70.38.09.00</p>
---	---














1- Partie haute
de l'Eolift®.

1- Top part of
the Eolift®.

© PHOTOÉQUIPE
SOLETANCHE FREYSSINET/
LAURENT CHARTIER


Freyssinet
SUSTAINABLE TECHNOLOGIES


Freyssinet
SUSTAINABLE TECHNOLOGIES

ATENÇÃO
CUIDADO
COM O
CABO

ATENÇÃO
CUIDADO
COM O
CABO

ATENÇÃO
CUIDADO
COM O
CABO

MÂTS EN BÉTON DE LA FERME ÉOLIENNE DE TRAIRI AU BRÉSIL

AUTEURS : JEAN DANIEL LEBON, DIRECTEUR ENERGIES RENOUVELABLES, FREYSSINET - MARCO NOVARIN, DIRECTEUR DÉPARTEMENT STRUCTURES, FREYSSINET - GIULIO SCOTTO, CHEF DIVISION MÉTHODES DE CONSTRUCTION, FREYSSINET - JULIEN-ERDEM ERDOGAN, DIRECTEUR TECHNIQUE, FREYSSINET

LE PROJET ÉOLIEN DE TRAIRI, SITUÉ DANS L'ÉTAT DE CEARÁ AU BRÉSIL, A VU LA PREMIÈRE APPLICATION DE LA CONSTRUCTION DE MÂT D'ÉOLIENNE EN BÉTON PRÉCONTRAIT METTANT EN ŒUVRE LE PROCÉDÉ DE CONSTRUCTION EOLIFT®. UNE DES PARTICULARITÉS DU PROCÉDÉ EST D'ÉVITER LE RECOURS AU LEVAGE PAR GRUE DE FORTE CAPACITÉ DONT L'UTILISATION EST SOUVENT UN FACTEUR LIMITANT DANS LES PROJETS ÉOLIENS TERRESTRES DE GRANDE HAUTEUR. CETTE TECHNIQUE, QUI REQUIERT UNE CONCEPTION PARTICULIÈRE DES MÂTS EN BÉTON, A PERMIS D'ATTEINDRE UN RENDEMENT ÉLEVÉ DE LEVAGE NOTAMMENT GRÂCE À UNE SUSCEPTIBILITÉ MOINDRE AUX CONDITIONS DE VENT.



PRÉSENTATION DU PROJET

La ferme éolienne se trouve dans la commune de Trairi, état de Ceará au nord-est du Brésil (figure 2).

La ferme, d'une capacité de 97,2 MW, se situe à environ 120 km de Fortaleza, capitale de l'état, et compte 36 turbines ECO 122 de 2,7 MW construites par GE Renewable Energy (anciennement Alstom). Les turbines sont posées sur des mâts en béton à une hauteur de 119 m. La ferme a été construite par Engie Brazil (anciennement Tractebel Energias Complementares Participações Ltda). Pour des raisons administratives,

le projet est divisé en 4 parcs : Santa Monica (7 turbines), Cacimbas (7 turbines), Estrela (11 turbines) et Ouro Verde (11 turbines) (figure 3).

La construction de ces tours d'éolienne, généralement en acier, et l'installation des turbines exigent des grues de très

2- Plan de situation.

2- Location drawing.

forte capacité. Ces grues présentent plusieurs inconvénients :

- 1- Leur coût important et leur faible disponibilité ;
- 2- Leur taille et emprise au sol qui génèrent des contraintes de circulation des engins sur le site ;
- 3- Leur limitation d'utilisation en cas de vent au-delà d'une vitesse de 10 à 12 m/s. Cette limitation est d'autant plus contraignante que la hauteur de la tour est importante, et, combinée avec la limitation n°2, elle impacte fortement le planning de construction et de mise en service.

Pour pallier ces difficultés et permettre la construction de tours économiques de grande hauteur, Freyssinet a conçu une tour en béton précontraint et intégré dans sa conception la préfabrication ainsi qu'une nouvelle méthode de montage à l'aide d'un outil compact, l'Eolift®, qui permet la pose des éléments de tour et de la turbine sans grue de forte capacité, tout en s'affranchissant des limitations de vitesse du vent liées à l'usage de ces grues et les limitations logistiques et de transport pour les tours en acier.

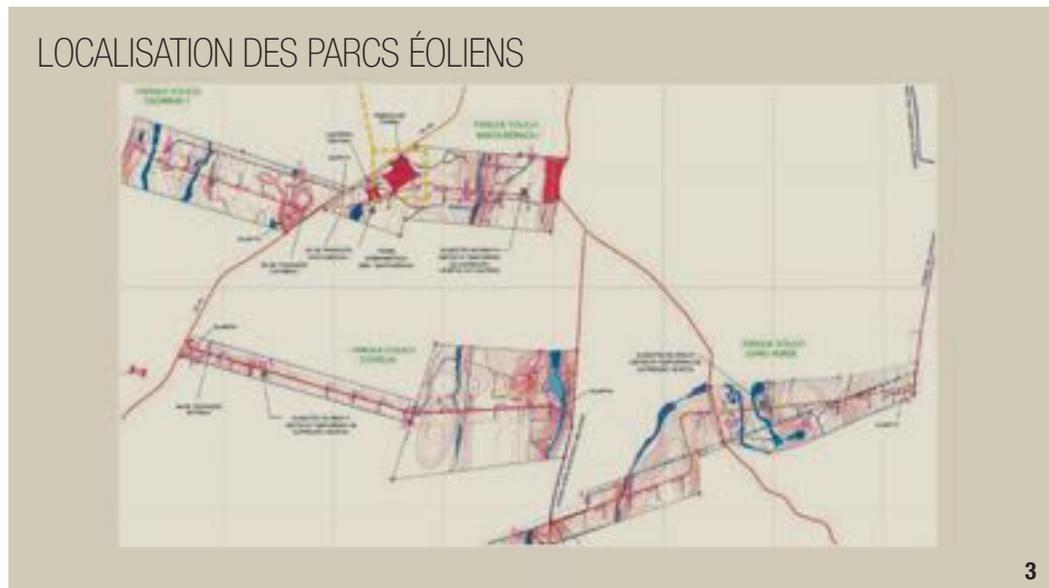
De plus, la compacité de l'Eolift® et la méthode de montage permettent également de réduire la taille des plateformes au pied de la tour, tout en autorisant la libre circulation des engins sur les pistes qui bordent ces plateformes.

PRÉSENTATION DE LA MISE EN ŒUVRE : PRÉFABRICATION ET ASSEMBLAGE

Le procédé consiste à préfabriquer la tour, au plus près du site, en anneaux d'environ 4 m de hauteur et à les transporter sur le site de construction. Lorsque le diamètre des anneaux dépasse les dimensions autorisées pour le transport sur route publique, les anneaux sont scindés en 2 parties qui sont ensuite réassemblées sur le site.

Les anneaux sont préfabriqués à joints conjugués et leur géométrie est contrôlée sur l'aire de préfabrication, pour éviter des ajustements de géométrie sur site.

Une première partie de la tour d'environ 27 m de hauteur, en fait sa partie haute, est assemblée sur la fondation. La turbine est également posée à la fin



3 © PHOTO THÉRIQUE SOLETANCHE FREYSSINET / LAURENT CHARTIER

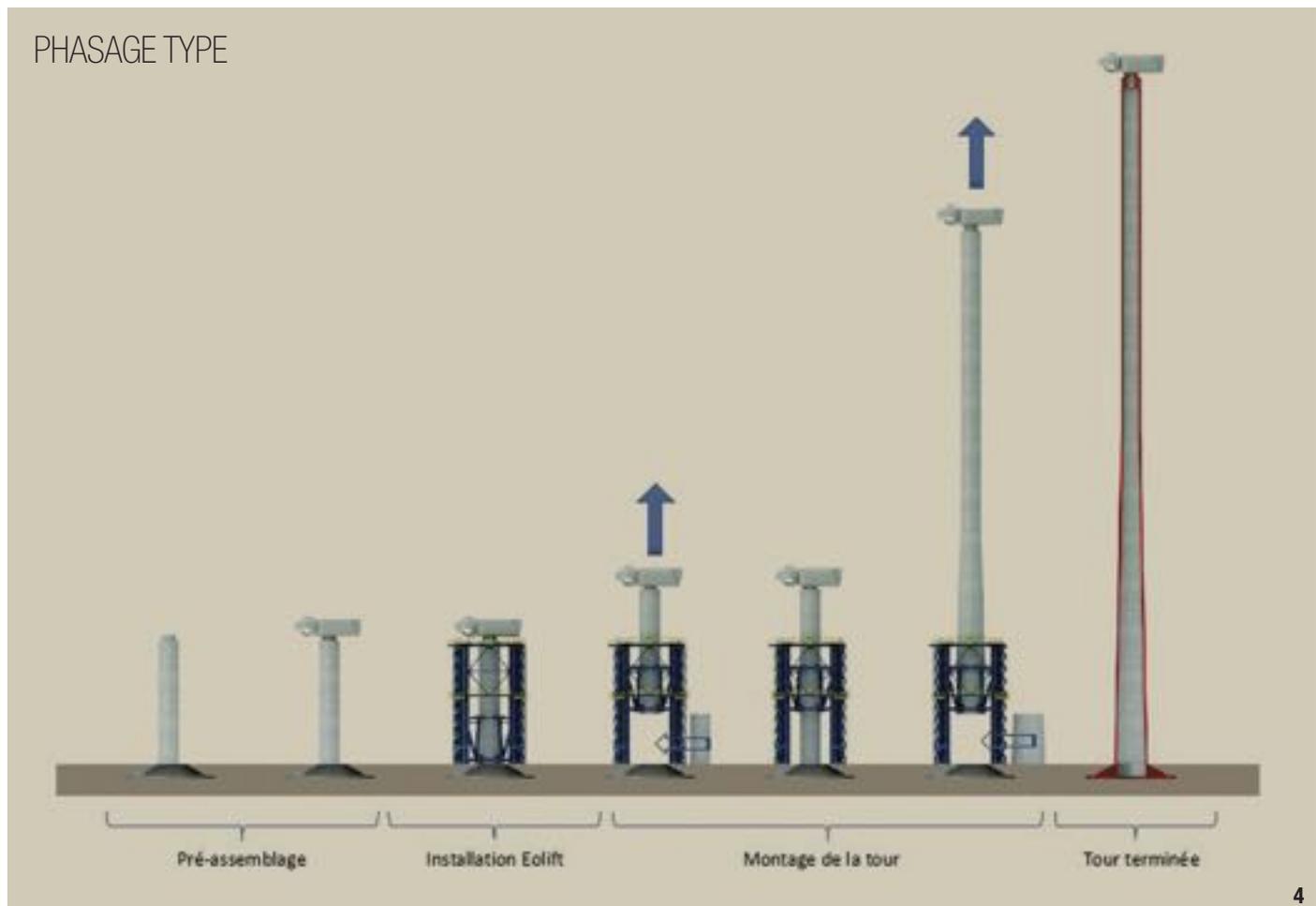
de cette phase. Ces opérations nécessitent des grues de relativement faible capacité (grue mobile de 300 t dans le cas de tours de 120 m et de turbine de 2,7 à 3,0 MW avec un poids maximal à soulever d'environ 90 t). Il s'agit de l'opération de pré-assemblage (figure 4).

3- Localisation des parcs éoliens.
4- Phasage type.

3- Location of wind farms.
4- Typical work sequencing.

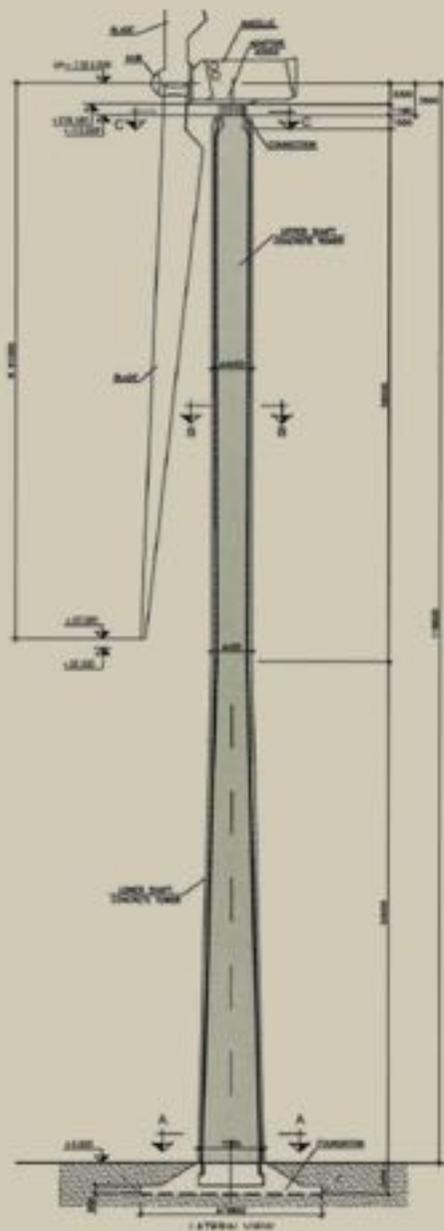
Une fois cette opération effectuée, l'outil de levage Eolift® est installé directement sur la fondation et connecté solidement à celle-ci au moyen de barres de brêlage.

Le premier assemblage de l'outil de levage Eolift® se fait directement sur une fondation. Il est réalisé au moyen



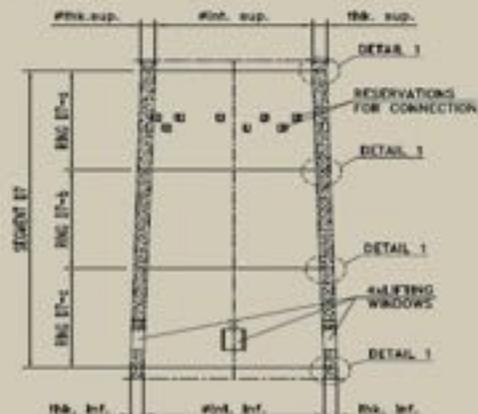
4 © PHOTO THÉRIQUE SOLETANCHE FREYSSINET / LAURENT CHARTIER

ÉLÉVATION DE LA TOUR



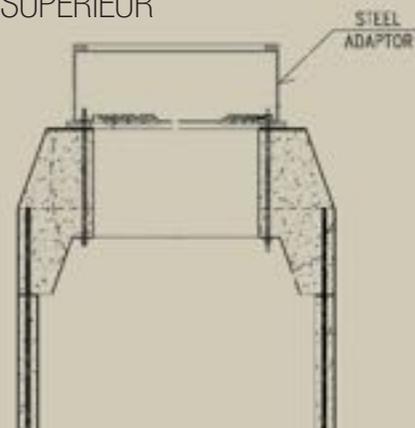
5

TRONÇON TYPE



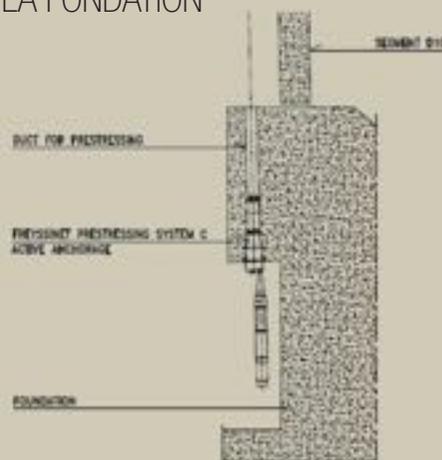
6

ANNEAU SUPÉRIEUR



7

ANCRAGES DES CÂBLES DE PRÉCONTRAINTE DANS LA FONDATION



8

de grues de relativement faible capacité (la même que celle utilisée pour le pré-assemblage et une grue d'appoint de 90 t). Un test de chargement est réalisé avant la première utilisation.

Une fois l'Eolift® installé sur la fondation, le levage de la partie préassemblée peut avoir lieu (figure 4). Pour ce faire, l'Eolift® est équipé d'une structure de préhension sur la partie de tour déjà assemblée. Cette structure de préhension, dite « cage intérieure », qui coulisse dans la structure principale de l'Eolift®, est constituée d'un cadre fermé équipé de 4 corbeaux de levage et de vérins horizontaux assurant la préhension pendant le levage.

5- Élévation de la tour.

6- Tronçon type.

7- Anneau supérieur.

8- Ancrages des câbles de précontrainte dans la fondation.

5- Elevation view of the tower.

6- Typical segment.

7- Upper ring.

8- Anchoring of prestressing cables in the foundation.

Le levage est réalisé à l'aide de 4 vérins à câbles de 600 t de capacité placés au sommet de l'Eolift®. Il est contrôlé par ordinateur.

Les autres anneaux sont préassemblés par groupes de trois sur des rails de ripage et constituent ainsi des éléments

de tour de 11 m de hauteur. Chaque élément est glissé sous la tour après le levage et assemblé par barres, une colle époxy est utilisée pour la réalisation des joints entre anneaux. Le processus est renouvelé jusqu'à la pose complète de la tour.



9

© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE FREYSSINET/ LAURENT CHARTIER

Après le montage de la première tour, l'outil de levage Eolift® est scindé en 2 parties (démontage des 4 poutres horizontales de connexion et des diagonales sur 2 faces opposées) qui sont déplacées à l'aide de transporteurs modulaires automoteurs. Cette méthode permet le transfert rapide de la tour déjà construite à la prochaine tour et le réassemblage de l'Eolift® (3 jours pour l'ensemble du process démontage-remontage et mise en route).

L'innovation ci-dessus a été mise en œuvre sur le projet de la ferme éolienne de Trairi au Brésil où Freyssinet a érigé, de mars 2016 à décembre 2016, 20 tours de 119 m. Chaque tour est composée de 32 anneaux préfabriqués en béton C60/75. Les joints entre anneaux sont garnis d'une colle époxy et la tour est précontrainte à l'aide de 16 câbles 13T15. Trois outils de levage ont été construits pour le projet de Trairi. Les levages sont réalisés avec des vitesses de vent allant jusqu'à 20 m/s sans interruption, ce qui est impossible avec une grue. Un cycle de 2 levages de jour (22 m) a été réalisé. Avec quelques améliorations de la conception et des outils de levage, un cycle global de moins de 10 jours est obtenu pour une tour éolienne de 145 m.

La réalisation du pré-assemblage au voisinage du sol et l'utilisation de l'Eolift® pour le levage et l'assemblage « par dessous » améliore grandement

la sécurité des opérations et réduit considérablement les aléas ainsi que les risques liés au travail en hauteur, tout en permettant une exécution plus rapide, quasiment indépendante de la vitesse du vent sur des sites où justement des vitesses importantes sont recherchées pour améliorer la production attendue. L'innovation permet également une réduction des plateformes

9- Précontrainte de la tour.

10- Déviateurs des câbles de précontrainte.

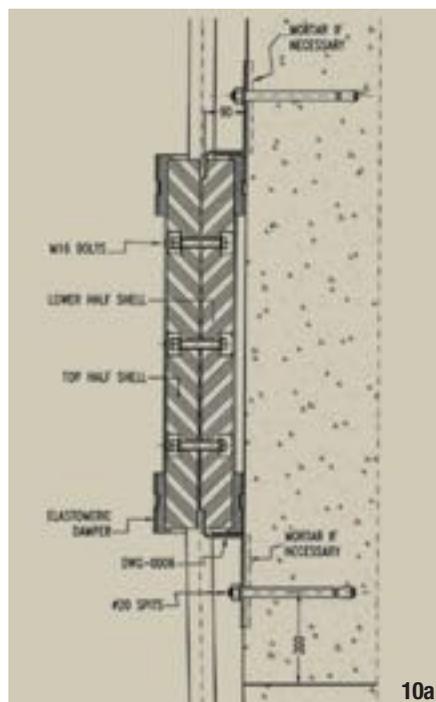
9- Tower prestressing.

10- Prestressing cable deviators.

de travail au pied des tours (par rapport aux méthodes classiques de montage à la grue) et une mise en service plus rapide des fermes éoliennes.

L'usine de préfabrication est construite dans l'enceinte de la ferme et comporte 11 stations de coffrage et de bétonnage.

Les coffrages ont été conçus pour être démontés et remontés rapidement,



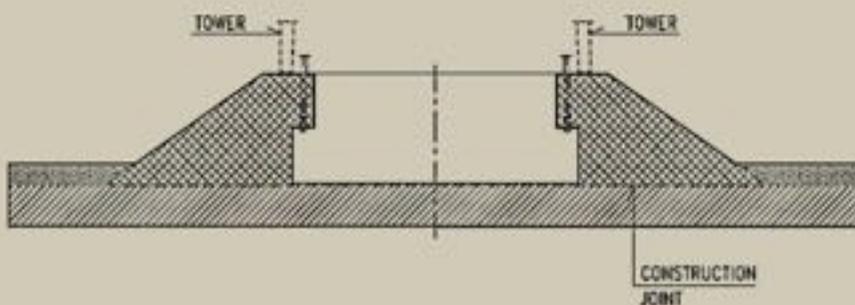
10a



10b

© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE FREYSSINET/ LAURENT CHARTIER

FONDATION



torons ancrés en partie haute, la mise en tension est réalisée toron par toron en partie basse.

PRÉSENTATION DE LA CONCEPTION : MÂT ET OUTIL DE LEVAGE

La conception structurelle de la tour et de son outil de levage est menée sur la base d'une approche globale de type « conception/construction », l'objectif étant d'installer des turbines de 3 MW de puissance à une hauteur maximale de 160 m.

La structure de la tour de Trairi, haute de 119 m, est constituée d'une fondation en béton armé et d'un fût en béton précontraint.

Le fût est divisé en deux parties principales : une partie conique haute de 55 m et une partie cylindrique haute de 58 m (figure 5). La conception de la tour, conforme aux IEC 61400, aux Eurocodes et, pour certains aspects concernant la résistance à la fatigue, au Model Code 90, a été certifiée par le Bureau Veritas.

11

notamment pour les parties coniques. La manipulation des anneaux est assurée au moyen de 2 portiques sur rail dans la zone de fabrication et d'un farrier dans la zone de stockage. Les cages de ferrailage et coffrages sont manipulés au moyen de grues mobiles légères.

11- Fondation.
12- Partie basse de l'Eolift®.

11- Foundation.
12- Lower part of the Eolift®.

L'usine est conçue pour produire 32 anneaux par semaine. À certaines périodes, la production hebdomadaire a été augmentée jusqu'à 45 anneaux par semaine.

Une fois la tour montée, la précontrainte est installée par hissage d'ensembles de 6 torons. Une fois tous les



12



13

© PHOTOThÉQUE SOLETANICHE FREYSSINET / LAURENT CHARTIER

Selon une technologie semblable à celle des tabliers de pont à voussoirs préfabriqués, la tour est constituée d'anneaux préfabriqués en béton C60/75 hauts de 3,6 m superposés par groupes de 3 pour former des tronçons de 11,0 m de hauteur (figure 6). Au sommet de la tour, un anneau de 5,5 m de hauteur est épaissi pour recevoir les ancrages des câbles extérieurs de précontrainte du fût et les barres précontraintes de liaison entre la structure en béton et l'adaptateur métallique la turbine (figure 7).

Les tronçons sont assemblés les uns sur les autres à l'emplacement final de la tour grâce à l'Eolift® et à son système de vérins hydrauliques. Une grue de dimension modeste est nécessaire pour la mise en place du premier tronçon et de la turbine. La tour est construite selon un système « du bas vers le haut » alimenté par le bas. Une fois la structure en béton assemblée, 16 câbles extérieurs post-tendus 13T15S sont mis en place et ancrés dans la fondation et dans l'anneau supérieur (figure 9). La mise en tension est effectuée dans la fondation à l'aide d'un vérin monotoron (figure 8).

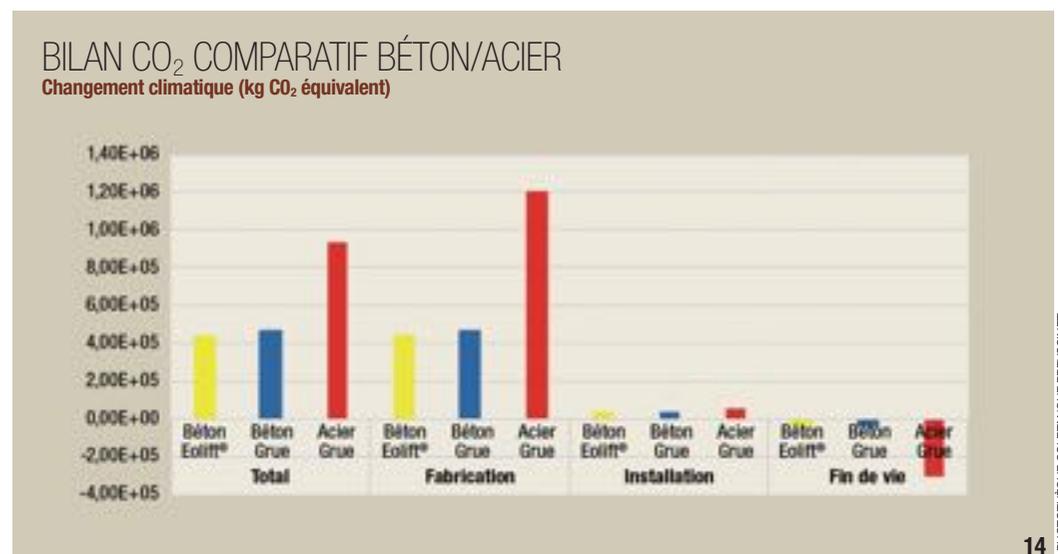
La forme de la tour impose une déviation des câbles à mi-hauteur. Cette déviation est obtenue moyennant des déviateurs dont la conception particulière, gouvernée par la bonne tenue à la fatigue des câbles, permet une durabilité optimum de ces derniers (figure 10). Les facteurs déterminants pour le coffrage de la tour se sont avérés être

13- Déplacement de l'Eolift®.
14- Bilan CO₂ comparatif béton/acier.

13- Moving the Eolift®.
14- Comparative CO₂ balance, concrete/steel.

les charges cycliques de fatigue et les plages de fréquences propres de la structure en béton fournies par le producteur des turbines.

La fondation est de type superficiel en béton C30/37 (figure 11). L'uniformité du contact entre le béton coulé en place de la fondation et le béton préfabriqué du premier segment est



14

© PHOTOThÉQUE SOLETANICHE FREYSSINET



obtenue à l'aide d'un mortier de pose coulé immédiatement avant la descente définitive du fût à sa position définitive. Pendant la construction de la tour, la fondation reçoit la descente de charge de l'Eolift®. La liaison entre l'Eolift® et la fondation est réalisée à l'aide de barres de précontrainte démontables. La méthode constructive propre à

l'Eolift® consiste à construire la tour du bas vers le haut à l'aide d'un système de levage hydraulique par adjonction successive de tronçons préfabriqués. L'Eolift® est opérationnel sous des conditions de vent allant jusque 20 m/s. Chaque phase de construction a été conçue de façon à réduire la durée des travaux : levage hydraulique, connexion

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE L'EOLIFT®

CAPACITÉ DE LEVAGE : 2 400 t
VITESSE MAXIMALE DU VENT PENDANT LE LEVAGE : 20 m/s
POIDS PROPRE: 560 t
HAUTEUR : 26 m
EMPRISE AU SOL : 16 m x 16 m
DIMENSIONS MAXIMALES DU TRONÇON : hauteur 12,0 m diamètre 7,2 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Engie Brazil (anciennement Tractebel Energias Complementares Participações Ltda)
CONSORTIUM : Freyssinet (Conception et construction des 36 mâts d'éoliennes) - GE Renewable Energy (Fourniture des 36 turbines, de l'opération et de la maintenance de la ferme)
BUREAU DE CONTRÔLE : Bureau Véritas (Certification de la conception des mâts)

des tronçons, mise en tension des câbles, et déplacement de l'Eolift® d'un emplacement à l'autre.

Les éléments principaux de l'Eolift® sont (figures 1 et 12) :

- Cage intérieure et Cage extérieure ;
- Rails de ripage du segment ;
- Vérins de réglages inférieurs, vérins de stabilisation et vérins de levage.

Afin de réduire au minimum le temps nécessaire au déplacement de l'Eolift® d'un emplacement à l'autre, les opérations de démontage ont été simplifiées et limitées. L'Eolift® a ainsi été conçu pour être séparé en deux moitiés transportables. Lors du déplacement, chaque moitié de l'Eolift® est connectée à un châssis sur kamags (figure 13).

Le poids d'une moitié d'Eolift® est de 280 t et son centre de gravité est situé à 13,0 m du sol. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 43 000 m³
ACIER PASSIF : 5 700 t
ARMATURE DE PRÉCONTRAÎTE : 1 060 t
NOMBRE DE MÂTS : 36 u
NOMBRE DE VOUSOIRS : 1 152 u

ABSTRACT

CONCRETE TOWERS FOR THE TRAIRI WIND-POWER FARM IN BRAZIL

JEAN DANIEL LEBON, FREYSSINET - MARCO NOVARIN, FREYSSINET
 GIULIO SCOTTO, FREYSSINET - JULIEN-ERDEM ERDOGAN, FREYSSINET

The demonstration project carried out in Brazil was able to demonstrate the feasibility of the innovation, the reliability of the method and its speed of execution, as well as the absence of hazards due to the wind speed in this region. The demonstration project also highlighted certain areas for improvement regarding the design, the prefabrication and mounting method and the associated Eolift® tool. The result is a shorter schedule and hence earlier connection to the grid. As part of the Brazilian project, in partnership with French environment and energy management agency ADEME (Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie), Freyssinet also produced a comparative carbon balance for concrete towers built using the Eolift® method and steel towers built by crane, which showed a reduction in greenhouse gas emissions. □

MÁSTILES DE HORMIGÓN EN EL PARQUE EÓLICO DE TRAIRI, EN BRASIL

JEAN DANIEL LEBON, FREYSSINET - MARCO NOVARIN, FREYSSINET
 GIULIO SCOTTO, FREYSSINET - JULIEN-ERDEM ERDOGAN, FREYSSINET

El proyecto piloto realizado en Brasil ha permitido demostrar la viabilidad de la innovación, la fiabilidad del método y su rapidez de ejecución, así como la ausencia de riesgos asociados a la velocidad del viento en esa región. Asimismo, el proyecto piloto ha revelado algunos ejes de mejora en el diseño, el método de prefabricación e instalación y la herramienta Eolift® asociada, que han permitido acortar la planificación y, por tanto, anticipar la conexión a la red. En el marco del proyecto brasileño, en colaboración con la agencia de desarrollo y control energético Ademe, Freyssinet también ha realizado un balance de carbono comparativo entre torres de hormigón construidas con el método Eolift® y torres de acero construidas con grúa, que ha revelado una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. □

LA TOUR SOLAIRE D'ASHALIM EN ISRAËL

AUTEURS : AUDREY ZONCO, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI - JEAN-BERNARD DATRY, DIRECTEUR, SETEC TPI - FRANÇOIS PRONGUÉ, PROJECT MANAGER, HEBETEC - THOMAS DUM, PROJECT MANAGER, GLEITBAU - GILLES OUDIN, DIRECTEUR, FERBECK INDUSTRIAL CHIMNEYS

EN PLEIN DÉSERT DU NÉGUEV, UNE INSTALLATION GIGANTESQUE PRODUIT DE L'ÉNERGIE DEPUIS LE PREMIER TRIMESTRE 2018. CETTE TECHNIQUE INÉDITE PERMETTRA À ISRAËL DE SE POSITIONNER DANS LES ÉNERGIES RENOUVELABLES. LA TOUR D'ASHALIM EST AUX PRÉMICES D'UNE RÉVOLUTION VERTE OÙ SONT PRÉSENTES LES ÉTUDES ET LES TECHNIQUES DE GÉNIE CIVIL LES PLUS COMPLEXES.



1 © MEGALIM LTD

ISRAËL S'ENGAGE VERS LE SOLAIRE

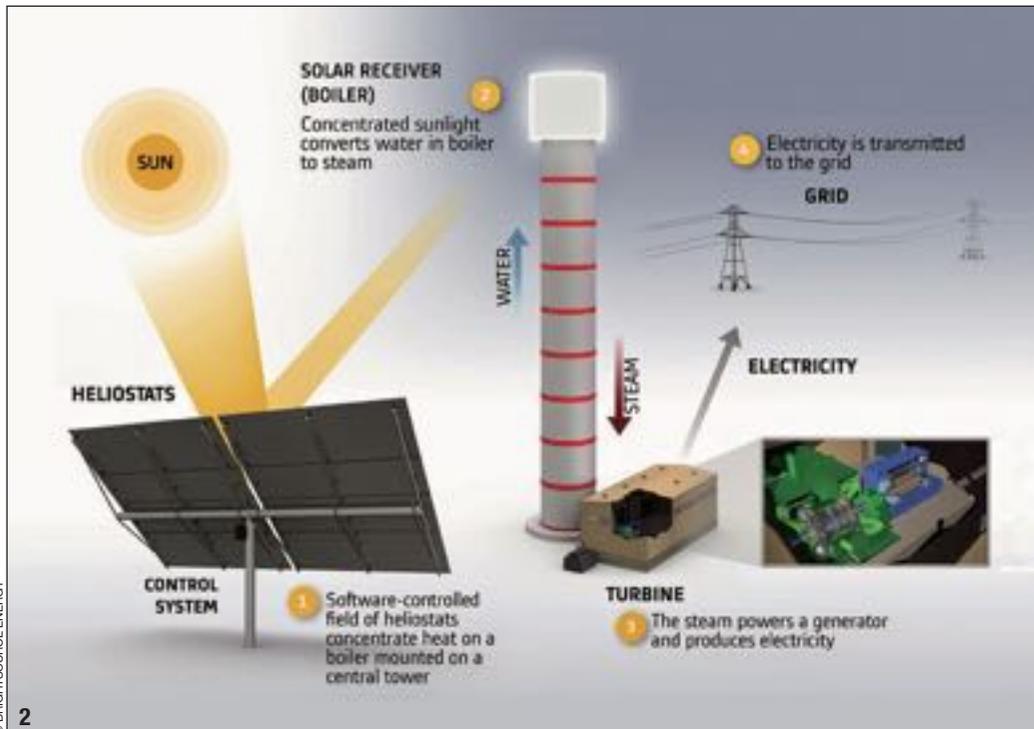
Israël s'est récemment fixé comme objectif de générer 10% de son énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2020, pour atteindre 17% d'ici 2030, et ce à partir du taux actuel de 2,5%. Ainsi, le gouvernement israélien a lancé en 2013 un appel d'offres pour un projet solaire dans le désert du Néguev en

Israël, près du kibboutz d'Ashalim, dans une zone située à environ 35 km au sud-sud-ouest de Beersheba. Il s'engage à acheter de l'électricité sur ce site pendant plus de 25 ans. L'enjeu est de taille car Israël pourrait en théorie répondre à tous ses besoins en électricité en utilisant seulement 4% du désert du Néguev. La centrale solaire d'Ashalim est composée de trois par-

1- Vue de l'ensemble du projet Ashalim en septembre 2017.

1- Overall view of the Ashalim project in september 2017.

celles, chacune dotée d'une technologie solaire différente, qui devraient au total générer environ 310 mégawatts (soit environ 1,6% des besoins énergétiques du pays). C'est le plus grand projet d'énergie renouvelable en Israël, et le 5^e plus grand dans le monde. Dans le futur, une quatrième parcelle est prévue avec une seconde centrale à concentration solaire (CSP).



2

Megalim Solar Power Limited a remporté l'appel d'offres pour la construction, la planification, le financement et l'exploitation de l'usine CSP située sur la parcelle B. C'est une société dédiée au projet, formée par le fonds d'investissement israélien NOY Infrastructure & Energy Investment Fund (49,9%), associé à GE Renewable Energy (25,05%) pour l'ingénierie et la construction et BrightSource (25,05%) pour la technologie thermodynamique. Le coût total du projet est d'environ 660 millions d'euros, dont environ 25 millions d'euros pour le génie civil de la tour.

2- Fonctionnement d'une tour solaire.
3- Cinématique de la chaudière.

2- Operation of a solar tower.
3- Boiler kinematics.

SPÉCIFICITÉS DE LA TOUR ASHALIM

Une tour solaire est un type de centrale solaire thermodynamique utilisant une tour pour recevoir les rayons solaires concentrés à partir d'un champ d'héliostats contrôlés par ordinateur. Il en existe environ une dizaine dans le monde, notamment au Maroc, en Afrique du Sud et en Californie, où les tours de 137 m de haut à Ivanpah dans le désert de Mojave étaient encore les plus hautes du monde avant la construction d'Ashalim. La tour Ashalim est la tour solaire

la plus haute du monde, atteignant 240 m, plus haute que la Tour Montparnasse de Paris ou le Gherkin de Londres. Si la tour est aussi haute, c'est que les panneaux ont été resserrés les uns contre les autres pour optimiser l'utilisation des terres - et plus les panneaux sont proches, plus la tour doit être grande. À la base de la tour, 55 000 héliostats répartis sur une zone de 300 ha - l'équivalent de plus de 400 terrains de football - suivent la course du soleil, comme des tournesols et réfléchissent la lumière du soleil au sommet de la tour sur une chaudière spécifique appelée boiler, un générateur de vapeur à récepteur solaire qui ressemble à une ampoule géante. Ainsi, la tour, telle un phare, est visible à des dizaines de kilomètres à la ronde dans ce désert rocailleux. Quand les rayons solaires concentrés frappent la chaudière sur sa surface active, sa température monte à 600 °C, et elle transforme l'eau en vapeur, qui est ensuite canalisée vers le pied de la tour et utilisée pour faire tourner une turbine à vapeur et créer de l'énergie mécanique (figure 2).

Le projet Ashalim s'appuie sur l'expérience acquise par Brightsource dans le cadre de la plus grande centrale à concentration au monde, Ivanpah Solar, mais apporte des innovations sur le design des héliostats dont la taille est multipliée par trois par rapport aux générations précédentes, et sur les connexions wifi. En ce qui concerne la technologie du récepteur, si le projet Ashalim utilise de la vapeur d'eau et n'a pas la capacité de stocker l'énergie, il faut noter que des nouvelles CSP utilisant du sodium liquide ou des sels fondus (40% de nitrate de potassium, 60% de nitrate de sodium) comme fluides de travail sont aujourd'hui en fonctionnement. Ces fluides ont une capacité thermique élevée, qui peut être utilisée pour stocker l'énergie avant de l'utiliser pour faire bouillir de l'eau et entraîner les turbines. Ces conceptions permettent donc de générer de l'énergie lorsque le soleil ne brille pas.

En ce qui concerne la structure de la tour, habituellement, les tours solaires sont faites d'une structure métallique en treillis. Les tuyaux qui transportent l'eau vers le haut et la vapeur vers le bas de la tour sont situés à l'intérieur du fût en treillis. Dans le cas d'Ashalim, le concept de construction consiste à utiliser une tour en béton comme une cage d'ascenseur pour la chaudière, conçue pour être soulevée d'un seul tenant par le bas.

CINÉMATIQUE DE LA CHAUDIÈRE



3

La chaudière et son plancher métallique sont assemblés sur le site, ensuite testés, dans un emplacement proche de la tour, puis déplacés à l'intérieur de la tour, enfin soulevés et ancrés dans leur position fonctionnelle au sommet de la tour (figure 3).

De cette façon, l'intérieur de la tour doit rester dégagé jusqu'au levage : tuyaux d'eau et de vapeur se trouvent à l'extérieur de la tour, dans une structure en acier appelée VPR (*vertical pipe rack*), préfabriquée sur place et soulevée grâce à une grue à tour Sarens dans sa position finale.

En pratique, la chaudière, le VPR et la tour sont construits en parallèle, afin de réduire le calendrier global du projet.

CONCEPTION DE LA STRUCTURE DE LA TOUR EN BÉTON GÉOMÉTRIE GÉNÉRALE

La tour en béton armé est haute de 209,515 m. Sa principale exigence fonctionnelle est d'élever et de porter la chaudière à son sommet.

Afin de laisser glisser la chaudière de 21,20 m de diamètre et 50 m de haut dans la tour, une ouverture de 23,7 m de largeur et de 52,515 m de hauteur doit y être réalisée.

En phase esquisse, Ferbeck Industrial Chimneys a comparé plusieurs géométries de tour pour accueillir cette ouverture (figure 4) :

- Une section carrée sur toute la hauteur, avec un portique autour de l'ouverture afin de restituer la rigidité d'un voile plein sous les forces latérales ;
- Une section circulaire sur toute la hauteur, afin de minimiser les efforts de vent (surface exposée et coefficient de force) ;

→ Une géométrie mixte, avec une section carrée sur les 57 premiers mètres avec un portique autour de l'ouverture, et une section circulaire sur les 120,515 m les plus hauts, les deux parties étant reliées par une pièce de transition de 31,515 m. Cette géométrie a été choisie comme le meilleur compromis pour réduire les charges de vent et les déformations latérales.

4- Les trois géométries étudiées.

5- Construction géométrique de la zone de transition.

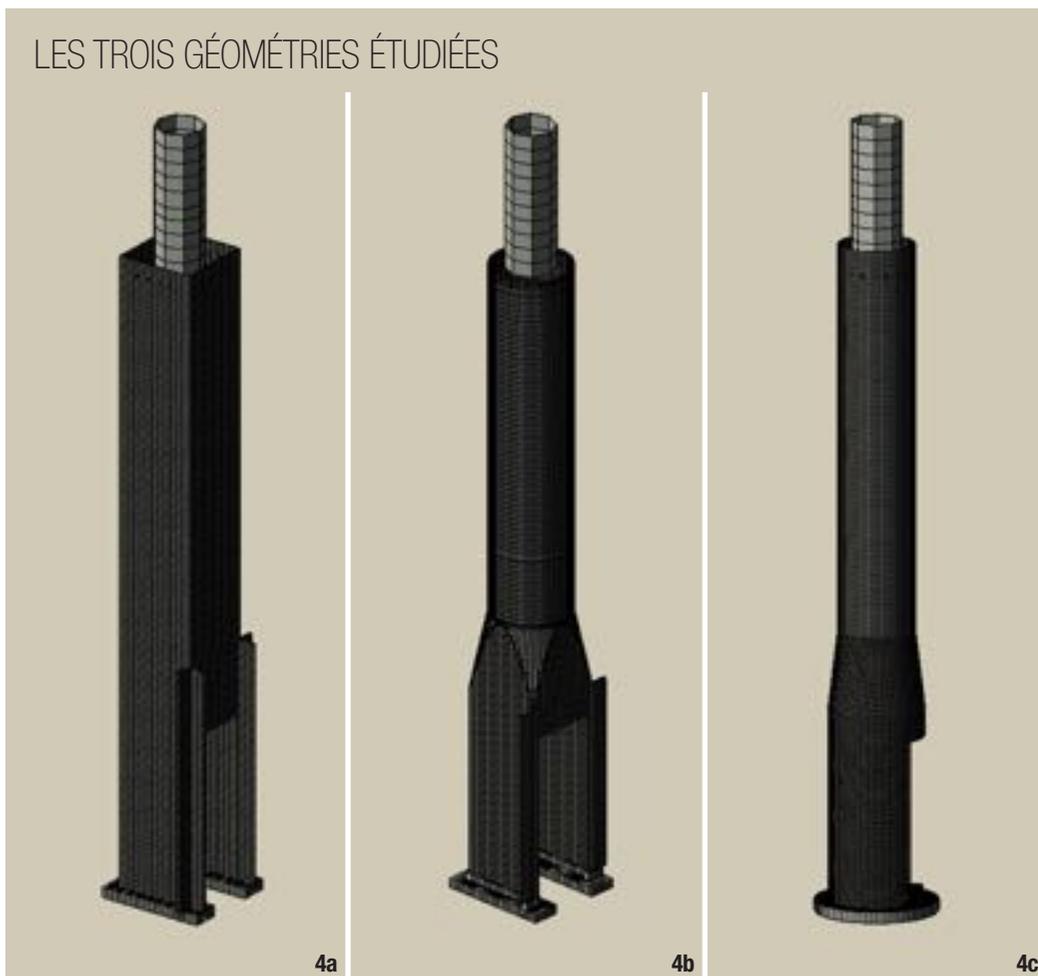
4- The three shapes studied.

5- Geometric construction of the transition zone.

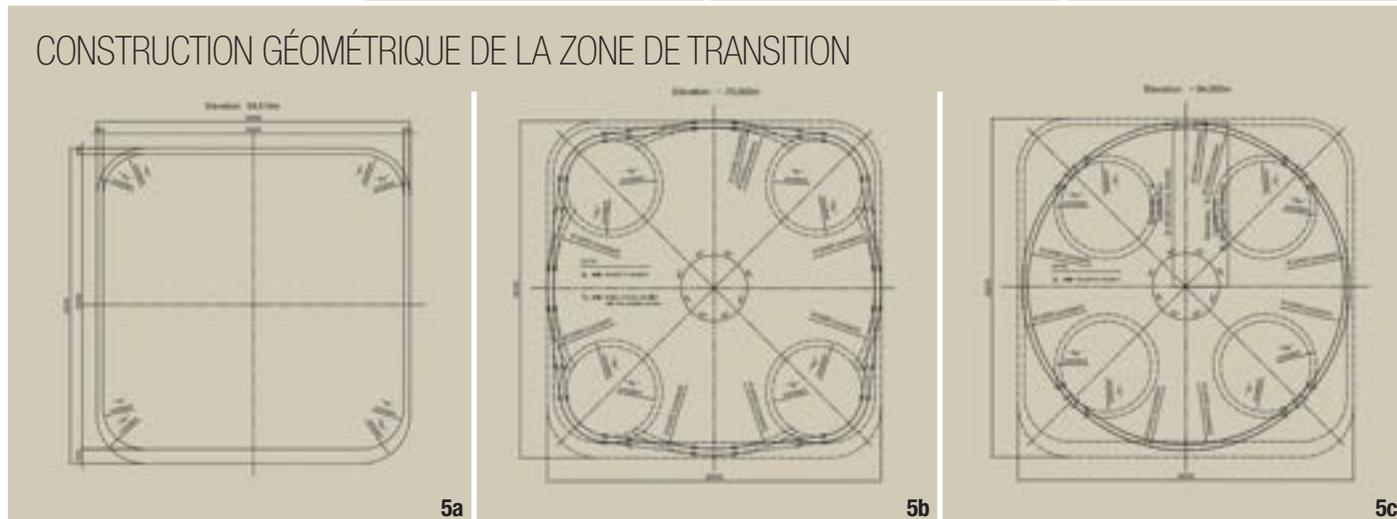
À 206,515 m du niveau du sol, un plancher métallique en acier porte la chaudière. Au sommet de la tour (209,515 m), une poutre de couronnement rigidifie la section circulaire. Une isolation est située de +186 au sommet de la tour +209,515, afin de limiter l'effet thermique du rayonnement solaire.

L'ensemble de la structure est enveloppé par une résille architecturale, initialement prévue en câbles précon-

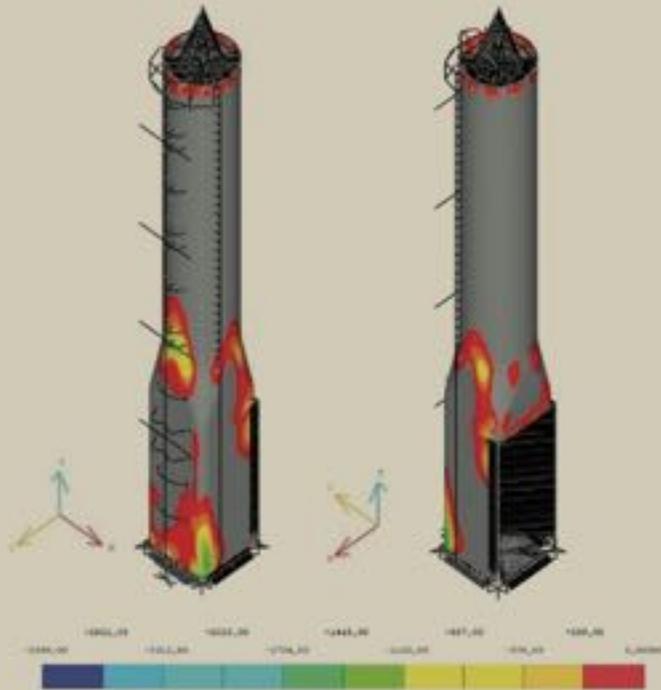
LES TROIS GÉOMÉTRIES ÉTUDIÉES



CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE LA ZONE DE TRANSITION

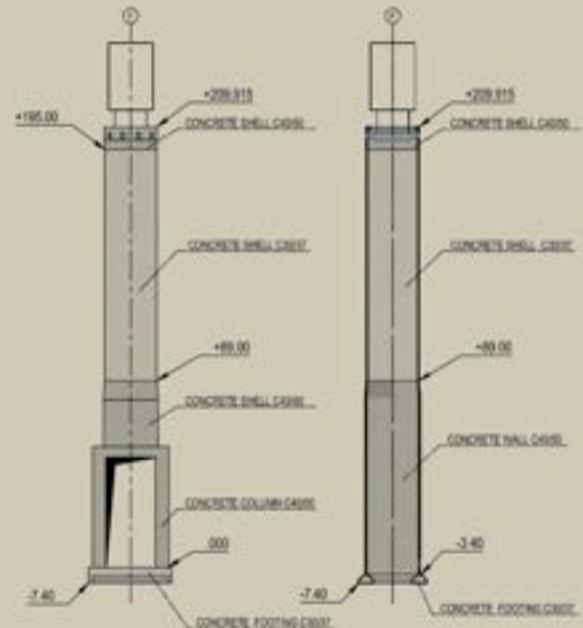


ZONES DE TRACTION VERTICALE



6

QUALITÉS DE BÉTON



7

traints, mais dont la constitution finale est encore à l'étude.

La conception en phase projet et exécution est réalisée par Setec tpi, selon les Eurocodes, pour une durée de vie de 25 ans.

Le cahier des charges donnait certaines valeurs, limites ou conditions spécifiques israéliennes, de sorte que la conception soit acceptée par le contrôleur israélien Galil. Le modèle global par éléments finis de la tour a été réalisé dans @Pythagore, un logiciel développé par Setec tpi, réputé pour permettre le calcul des structures en

6- Zones de traction verticale.

7- Qualités de béton.

8- Élévation du linteau.

6- Zones of vertical tension.

7- Properties of concrete.

8- Elevation view of lintel.

béton en tenant compte du calendrier et du phasage de construction, et dont les références sont nombreuses.

GÉOMÉTRIE DE LA ZONE DE TRANSITION

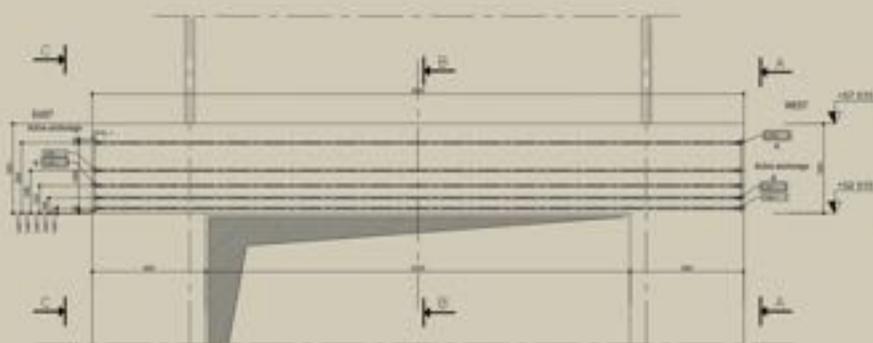
Le coffrage glissant est le choix logique pour construire cette tour solaire, en raison non seulement du planning de construction, mais aussi de la géométrie extrêmement complexe de cette tour.

En effet, le coffrage glissant est reconnu comme une méthode rapide, sûre et rentable pour la construction de tout

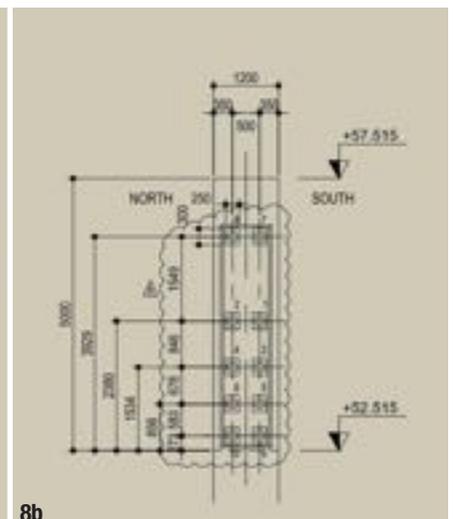
type de structures en béton, mais dans le cas spécifique d'Ashalim, Gleitbau Salzburg a mis au point un système de coffrage conique permettant des changements de géométrie compliqués sans interruption du processus de travail.

La géométrie précise de la zone de transition, qui passe d'un carré à un cercle, mais qui voit aussi des changements d'épaisseur des voiles (50 cm en pied, 35 cm en tête, 120 cm autour de l'ouverture), a été développée en étroite collaboration entre Setec tpi, concepteur de la tour, et Gleitbau, spécialiste du coffrage glissant (figure 5). ▷

ÉLÉVATION DU LINTEAU



8a



8b

9- Ferrailage de la fondation.
10- Coupes sur la fondation.

9- Foundation reinforcing bars.
10- Cross sections of foundation.

Elle résulte de contraintes pratiques de constructibilité d'une part - elle est constituée d'arcs de cercles de seulement deux rayons distincts (4 m et 12,4 m) et des lignes droites, afin de faciliter le façonnage et la mise en place des armatures - et de contraintes géométriques liées à l'outil coffrant d'autre part, telles qu'une inclinaison maximale, un rayon minimum dans le sens horizontal et vertical. À +89 m, la section transversale de 26 m de côté est devenue un cylindre de 24,8 m de diamètre.

CONCEPTION STRUCTURELLE DU FÛT

Dans la partie inférieure de la tour jusqu'à +52,515, la section transversale est un carré mesurant 26 m x 26 m, avec des congés de 4 m de rayon. Dans cette zone, le voile voit le cisaillement global maximal et la contrainte verticale maximale sous charges latérales, ainsi que la flexion locale due au vent.

La contrainte verticale moyenne en compression sous combinaisons de service est d'environ 10 MPa.

Le poids de la tour compense la traction due au moment de renversement du vent, sauf en bas dans les angles du fait du traînage de cisaillement et dans la zone de transition où subsiste de la traction (figure 6).

Les moments de flexion transversaux et longitudinaux locaux dus au vent, dans la partie ouverte, sont proches des moments de flexion d'une plaque infinie sur trois côtés.

L'épaisseur requise est de 50 cm, et la qualité du béton C40/50.

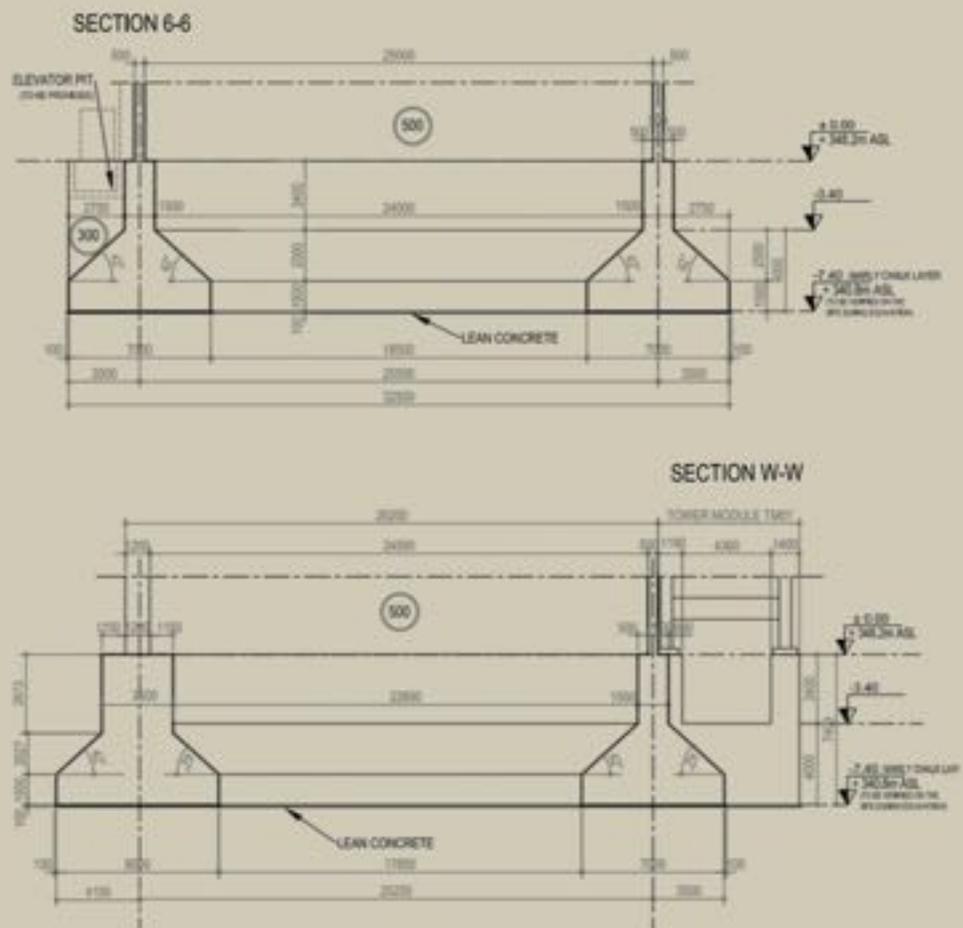
Dans la partie cylindrique, il n'y a pas de traction verticale sous combinaisons de service. L'épaisseur requise est de 35 cm et la qualité du béton C30/37 (figure 7).

Au sommet de la tour, une poutre de couronnement de 1,65 m de large et 1,3 m de haut permet de rigidifier la section cylindrique mais sert aussi d'appui des vérins de levage de la chaudière.



9 05

COUPES SUR LA FONDATION



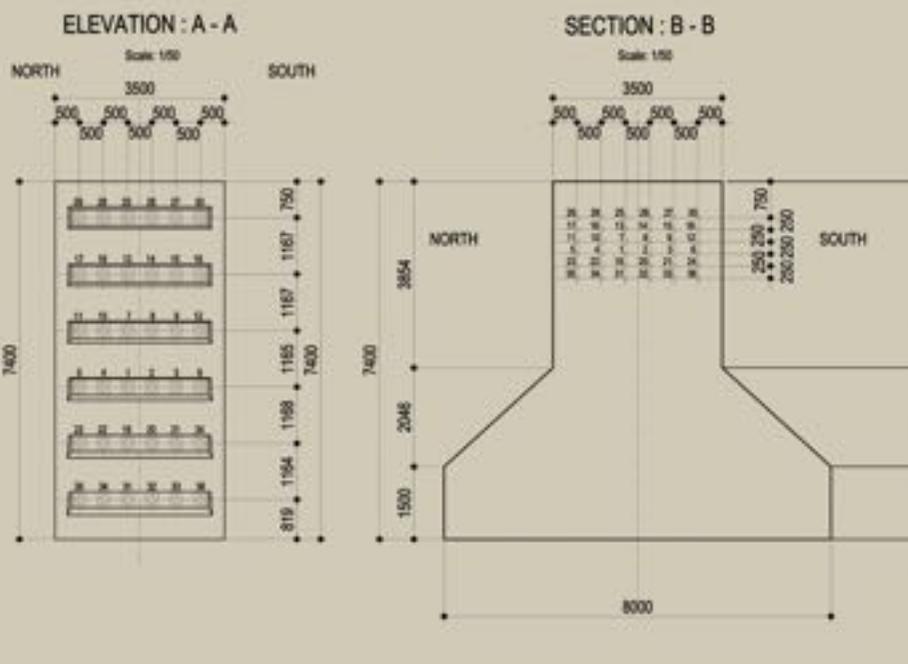
10 © SETEC TPI

ÉLÉVATION DE LA FONDATION NORD



© DR 11

COUPES SUR LA FONDATION NORD



© DR 12

11- Élévation de la fondation Nord.

12- Coupes sur la fondation Nord.

11- Elevation view of North foundation.

12- Cross sections of North foundation.

CADRE PRÉCONTRAIT AUTOUR DE L'OUVERTURE

Le cadre autour de l'ouverture a deux fonctions. D'une part, il rigidifie la face Nord avec pour objectif de restituer la même rigidité que le mur plein sur la face Sud, et d'éviter la torsion de la tour sous les charges de vent Est/Ouest. Poteaux et linteau voient un diagramme de moment bitriangulaire sous les efforts de vent. Leur épaisseur de 1,20 m est l'épaisseur maximale recommandée pour limiter la différence de vitesses de prise avec le reste des voiles du même niveau, de 50 cm d'épaisseur.

D'autre part, le linteau du portique constitue le tirant de la poutre-voile au-dessus de l'ouverture. Cinq lits de paires de câbles de précontrainte 19T15S sont mis en place dans le linteau, de sorte qu'il est toujours comprimé, même sous la combinaison de service impliquant le vent du sud. Les câbles sont disposés en alignement droit, pour faciliter la construction. Leur position en hauteur est déterminée de sorte qu'ils prennent chacun la même traction : puisqu'à mi-travée et sans aucune précontrainte, le linteau est soumis à la fois à la traction et à un moment positif, les câbles sont plus

espacés dans la partie supérieure et moins espacés dans la partie inférieure du linteau (figure 8).

La mise en tension devait initialement être faite après l'achèvement du linteau et avant la reprise du glissement du coffrage, de façon à ce que toute la précontrainte reste dans le linteau et ne se « perde » pas dans les voiles supérieurs. De plus, cela permettait au linteau, encore souple, de se détacher du coffrage lors de l'application de la précontrainte. Pour des raisons de planning de construction, le linteau est précontraint une fois la tour réalisée jusqu'à +71 m. Par conséquent, le

linteau doit être vérifié pour supporter le poids du béton correspondant, sans précontrainte.

En outre, les câbles devaient initialement être mis en tension en commençant par les lits centraux, et alternativement des côtés droit et gauche, afin d'avoir la tension moyenne la plus uniforme possible. Afin de réduire les déplacements des vérins, ils sont mis en tension d'un seul côté et de bas en haut. Cela implique que les torons soient coupés juste après la mise en tension.

UNE FONDATION SUPERFICIELLE DE 7,40 m DE HAUT

Les sondages géotechniques réalisés sur le site sous la supervision de Setec Terrasol, ont mis en évidence de la craie marneuse, sous les dépôts alluviaux et jusqu'au fond des forages (de 15 à 20 m de profondeur). La fondation retenue pour la tour est une fondation superficielle, basée au sommet de la couche de craie marneuse, de géométrie carrée (32,50 m de côté) et vide en son centre (figures 9 et 10).



© DR 15

concepteur de la tour. Afin d'éviter tout transfert de poids, les deux structures sont verticalement indépendantes, grâce à des liaisons par des bielles bi-articulées. Ceci permet également à la tour de pouvoir se courber sous un gradient longitudinal thermique sans créer d'effort vertical dans le VPR. Seules les charges horizontales sont transférées du VPR à la tour en béton, grâce aux bielles pour les vents Nord-Sud et grâce une clé de cisaillement centrale pour les vents Est-Ouest. La disposition des bielles et clés de cisaillement est conçue de manière à éliminer tout effet hyperstatique dans le VPR, et à éviter l'influence de l'ova-

15- Coffrage sur la partie cylindrique.

16- Coffrage sur la hauteur de l'ouverture.

17- Poutre treillis supportant le coffrage du linteau.

15- Formwork on the cylindrical part.

16- Formwork over the aperture height.

17- Lattice beam supporting the lintel formwork.

lisation de la tour, qui augmenterait les efforts dans le VPR. Pour gérer les tolérances de construction, les bielles sont constituées de tiges filetées coupées à longueur après relevé géométrique de la tour béton et la clé de cisaillement dispose d'un interstice qui peut être rempli par des plaques métalliques de calage (figure 14).

LES SPÉCIFICITÉS DU COFFRAGE GLISSANT

La vitesse du glissement est conditionnée par la logistique (rythme de d'approvisionnement des matériaux sur la plateforme de travail) et l'exécution des travaux (durée de mise en place des

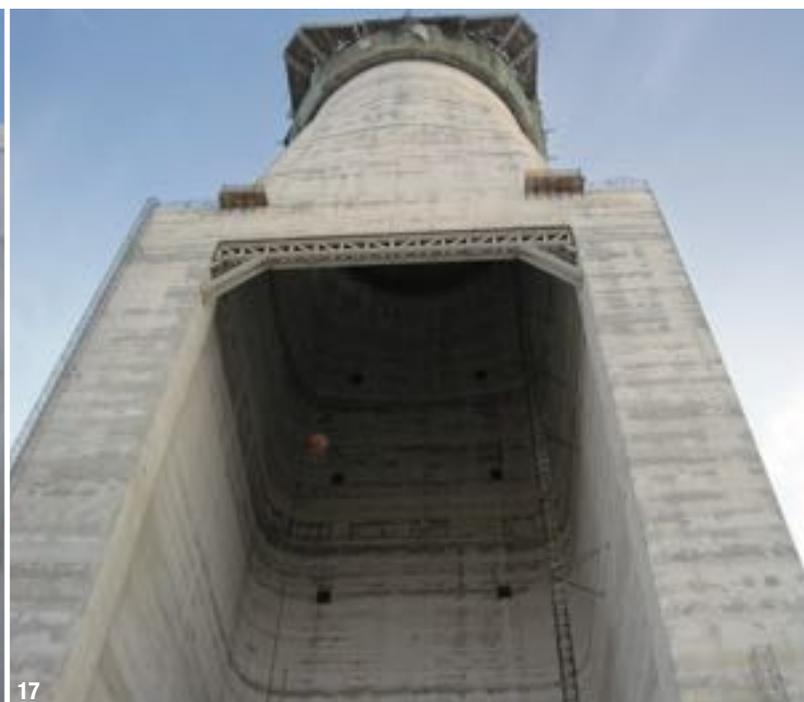
armatures, des inserts, durée de coulage). Il est nécessaire de faire quatre arrêts techniques : à la base du linteau, à l'arase supérieure des poteaux, environ 20 m au-dessus de l'ouverture pour la mise en tension des câbles du linteau et au sommet de la tour sous la poutre de couronnement.

Outre la transition du carré au cylindre, expliquée plus haut, la conception du coffrage doit répondre à plusieurs autres défis, notamment la grande ouverture Nord. Le système de coffrage conique, qui doit être utilisé en raison de la géométrie de la tour, nécessite une plate-forme de travail supérieure qui s'étend sur toute la surface de la tour (figure 15), et l'assemblage de tous les coffrages dès le démarrage à la base de la tour. En raison de la dimension de l'ouverture, il n'est pas possible de procéder comme pour les baies de petite taille, pour lesquelles les tiges de montage du coffrage glissant restent en place et sont contreventées pour éviter leur flambement. Il faut ici prévoir de porter la plateforme de travail d'une autre manière sur la hauteur de l'ouverture (figure 16). Et il faut également une structure pour porter le linteau et la poutre-voile au-dessus de l'ouverture (figure 17).

La conception du coffrage permet de répondre à ces deux conditions grâce à une poutre treillis métallique portée par l'outil coffrant. La durée d'inter-ruption du glissement peut également être minimisée grâce à ce système sophistiqué. ▷



16
© GLEITBAU



17
© GLEITBAU

DES OPÉRATIONS DE MANUTENTION EXTRAORDINAIRES

Les manutentions sont confiées à Hebetec Engineering SA qui a mis en œuvre les techniques de ripage sur coussin d'air (APS) et de levage par câble.

TRANSLATION SUR COUSSIN D'AIR

La première opération consiste à insérer le système de translation sous le plancher métallique supportant la chaudière du *boiler*, qui repose sur des socles en béton.

Les chemins de glissement (*Skidways light*) sont ripés sur la dalle en béton, puis les modules APS, par groupe de deux, surmontés de leur poutre de répartition, sont, à leur tour, placés sous les points de levage (figure 18).

Une fois le système hydraulique achevé, le *boiler* est décollé des socles sur lesquels il a été construit.

À l'occasion de cette première prise en charge, le poids exact effectif de l'ensemble *boiler/grid* peut être constaté par pesage, il est de 2200 t.

La première étape de ripage en direction de la tour peut avoir lieu (figure 19).

Le linéaire de chemin de ripage disponible étant limité et l'emplacement final encore occupé par les opérations d'abaissement du coffrage glissant, le ripage se fait par étapes successives, en plaçant à l'avancement les chemins de ripage libérés à l'arrière.

La chaudière est ainsi positionnée au centre de la tour en trois étapes.

Avant la dernière étape, l'ensemble des câbles de levage qui n'entravent pas l'entrée du boiler dans la tour sont préalablement installés. Il reste donc à terminer cette opération par l'installation des 6 câbles disposés dans la zone de passage.

La chaudière étant en attente sur les APS en position basse pendant la mise en place de ces derniers.

LEVAGE PAR CÂBLES

L'insertion des câbles de levage dans les tubes de passage du *grid* et le montage des ancrages d'extrémité étant réalisés, la chaudière peut dès lors être prise en charge par les vérins à câble et commencer son ascension (figures 20 et 21).

Au nombre de 20, les câbles de levage sont constitués de 19 torons de précontrainte chacun et représentent au total un tonnage d'acier de 80 t environ. Le levage se déroule en continu en



18

© HEBETEC



19

© HEBETEC

alternant les équipes de jour et de nuit pendant 5 jours, le rythme étant dicté par le travail de découpe et d'évacuation des torons au fur et à mesure de l'avancement du levage.

Trois roues sont montées sur le plancher métallique pour le guider le long du fût lors de l'ascension, notamment en cas de vent. Le levage est réalisé sous couvert météo.

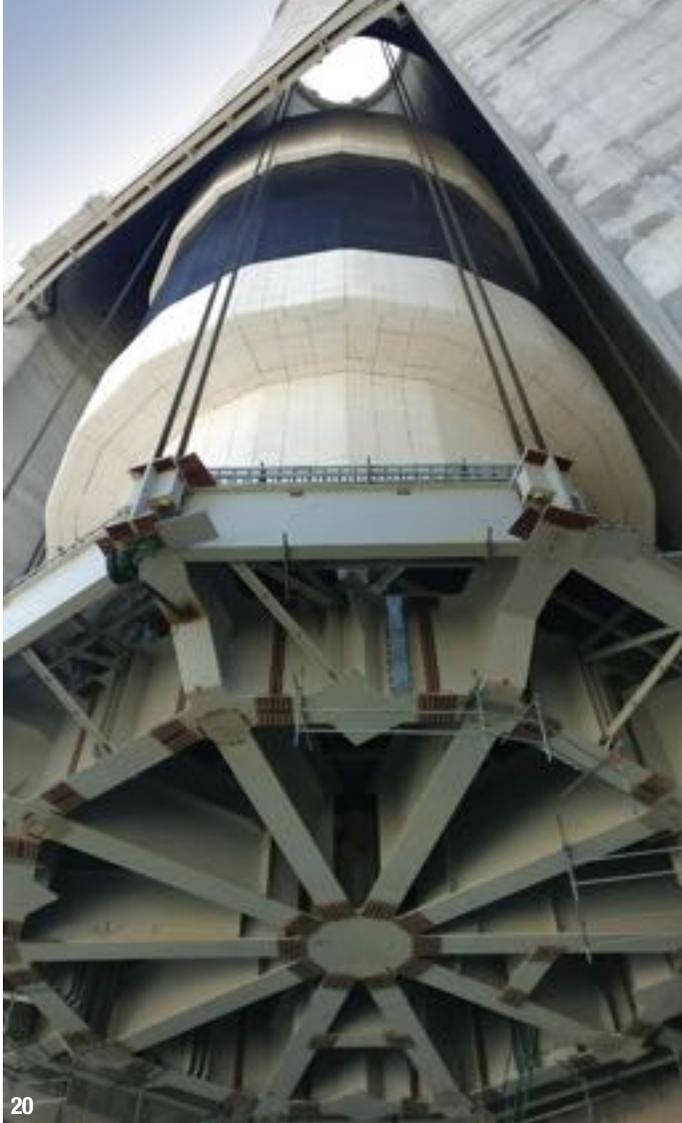
Au terme du levage, la chaudière est positionnée quelques dizaines de centimètres au-dessus de son altitude finale, afin de faciliter le montage des extensions des poutres du plancher métal-

QUELQUES DATES

- **Novembre 2014** : lancement des études d'exécution par setec tpi
- **Août 2015** : construction de plancher métallique
- **Octobre 2015 - octobre 2016** : construction de la chaudière
- **Juillet-décembre 2015** : fondation
- **Juin 2016** : démarrage du coffrage glissant
- **Novembre 2016** : mise en précontrainte du linteau
- **Janvier 2017** : achèvement de la poutre de couronnement
- **28 juillet au 2 août 2017** : levage de la chaudière
- **Novembre 2016 - décembre 2017** : mise en place du VPR
- **Janvier 2018** : mise en service

18- Insertion du système de translation APS.
19- Translation de la chaudière.

18- Insertion of the APS travelling system.
19- Boiler travelling.



© DS 20

lique, qui permettent à la chaudière de s'appuyer dans les fenêtres prévues à cet effet. Elle reste ainsi suspendue aux câbles une semaine environ pour effectuer le boulonnage des extensions, puis est abaissée et déposée sur ces appuis définitifs.

CONCLUSION

La tour solaire d'Ashalim est une première en termes d'économie d'énergie, par son importance et sa technologie. De nouveaux développements sont prévus au niveau de la technologie des chaudières pour stocker l'énergie acquise pendant le jour. Les métiers du

20- Soulèvement de la chaudière.
21- Ascension de la chaudière.

20- Lifting up the boiler.
21- Boiler raising.

génie civil et du levage de haute capacité apportent leur contribution et l'on peut souhaiter de nouveaux débouchés pour nos ingénieristes et entreprises. □



21

© DS

QUELQUES CHIFFRES

PUISSANCE PRODUITE : 121 MW
NOMBRE DE MIROIRS ÉLECTRONIQUEMENT COMMANDÉS : 50 000 u
POIDS DE LA TOUR : 30 000 t
POIDS DE LA CHAUDIÈRE : 2 200 t en stade de levage
VOLUME DE BÉTON : 11 600 m³
QUANTITÉ DE FERRAILLAGE : 3 200 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Megalim Solar Power Ltd
RESPONSABLE DU PROJET CLÉ EN MAIN, CONCEPTION DE L'USINE ET DE LA CHAUDIÈRE : General Electrics
TECHNOLOGIE DU CHAMP SOLAIRE : Brightsource
CONCEPTEUR DU PRELIMINARY DESIGN ET CONSTRUCTEUR DE LA TOUR : Ferbeck Industrial Chimneys
CONCEPTION, CALCULS ET PLANS D'EXÉCUTION DE LA TOUR BÉTON ET DU PLANCHER MÉTALLIQUE : Setec tpi
LEVAGEUR DE LA CHAUDIÈRE : Hebetec
CONCEPTEUR ET FOURNISSEUR ET OPÉRATEUR DE L'OUTIL COFFRANT : Gleitbau
CALCULS ET PLANS D'EXÉCUTION DU RACK MÉTALLIQUE VERTICAL : Idom

ABSTRACT

THE ASHALIM SOLAR TOWER IN ISRAEL

AUDREY ZONCO, SETEC TPI - JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI - FRANÇOIS PRONGUÉ, HEBETEC - THOMAS DUM, GLEITBAU - GILLES OUDIN, FERBECK INDUSTRIAL CHIMNEYS

The Ashalim solar tower is the tallest tower of this type in the world, with a total height of 240 metres. At the time of its delivery in the first quarter of 2018, it would supply 1.6% of Israel's energy using a field of 50,000 mirrors set up on 300 hectares of land. Designed by Ferbeck Industrial Chimneys and Setec tpi, its construction made use of reinforced concrete and prestressing techniques for the lintels and the foundation. Concreting was performed with a variable-geometry sliding formwork developed by Gleitbau. The solar tower was hoisted using techniques of travelling on sliding pads and lifting by cable reel jacks developed by Hebetec. The design engineering required wind-tunnel tests in the various construction and service configurations, and complex calculations for each construction phase. A fine example of civil works used for renewable energies. □

LA TORRE SOLAR DE ASHALIM EN ISRAEL

AUDREY ZONCO, SETEC TPI - JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI - FRANÇOIS PRONGUÉ, HEBETEC - THOMAS DUM, GLEITBAU - GILLES OUDIN, FERBECK INDUSTRIAL CHIMNEYS

La torre solar de Ashalim es la torre de este tipo más alta del mundo, con una altura total de 240 m. En el momento de su entrega, en el primer trimestre de 2018, generará el 1,6% de la energía de Israel gracias a un campo de 50.000 espejos dispuestos sobre 300 hectáreas. Diseñada por Ferbeck Industrial Chimneys y Setec tpi, en su realización se han empleado las técnicas del hormigón armado y del pretensado para los dinteles y la cimentación. El hormigonado se ha llevado a cabo mediante un encofrado deslizante de geometría variable diseñado por Gleitbau. El izado del horno solar se ha basado en técnicas de traslación sobre patines deslizantes y de elevación por cilindros hidráulicos tragacable desarrollados por Hebetec. Los estudios han requerido ensayos en túnel de viento de las distintas configuraciones constructivas y de servicio, así como complejos cálculos para cada fase de construcción. Un excelente ejemplo de ingeniería civil al servicio de las energías renovables. □

LUCIOLE® : L'ÉCLAIRAGE INTELLIGENT

« AU JUSTE BESOIN »

AUTEURS : FLAVIEN GEISLER, CHEF DE PROJETS RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FRANÇOIS OLARD, DIRECTEUR RECHERCHE & INNOVATION, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FABIEN MAGRIN, DIRECTION COMMERCIALE, EIFFAGE ENERGIE SYSTÈMES

EIFFAGE A MIS AU POINT LE PROCÉDÉ INNOVANT LUCIOLE®, ALLIANT LES PROPRIÉTÉS PHOTOMÉTRIQUES D'UN REVÊTEMENT ROUTIER CLAIR ET LA MISE EN ŒUVRE DE RÉVERBÈRES À LAMPES LED « INTELLIGENTS » ET DYNAMIQUES. LUCIOLE® PERMET D'ÉCLAIRER « AU JUSTE BESOIN » EN FAISANT VARIER AUTOMATIQUEMENT L'INTENSITÉ LUMINEUSE EN FONCTION DE LA PRÉSENCE ET DE LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DU SUJET. COÛT DE FONCTIONNEMENT ET EMPREINTE CARBONE FAIBLES (-50 %), MOINDRE POLLUTION LUMINEUSE, TELLES SONT LES CARACTÉRISTIQUES DE LUCIOLE®. LUCIOLE® EST LAURÉAT 2017 DU CONCOURS « INNOVATION ROUTES ET RUES ».

INTRODUCTION

Le concept de Luciole® est né d'un constat simple et pragmatique : qui ne s'est en effet jamais posé la question d'une économie d'énergie possible au niveau de tous ces réverbères illuminant à longueur de nuit nos rues, nos places et nos avenues ? Certes, ils assurent confort et sécurité lors de nos déplacements nocturnes, mais nombre d'entre eux fonctionnent souvent toute la nuit pour ne voir réellement que le passage sporadique de quelques piétons ou véhicules isolés.

De fait, l'éclairage public est l'un des postes de dépense les plus importants pour le fonctionnement des collectivités territoriales.

En France, l'énergie consommée par l'éclairage public représente^[1] :

- 41 % des consommations d'électricité des collectivités territoriales ;
- 16 % de leurs consommations toutes énergies confondues ;
- 37 % de leur facture d'électricité.

Certaines d'entre elles ont procédé ces dernières années au remplacement des ampoules classiques par des technologies de type LED. Elles ont ainsi pu mesurer des premières économies d'énergie sensibles. On estime cependant que seulement 10% du parc de l'éclairage public français est équipé de technologie LED et qu'il reste encore beaucoup à faire en la matière.

D'autres collectivités ont également modifié assez radicalement leur politique d'éclairage public, en jouant sur les horaires d'allumage et d'extinction



des points lumineux en fonction des besoins et des fréquentations des différents lieux.

Certaines zones ou axes routiers sont ainsi, de fait, non éclairés à certaines heures de la nuit. Le cas des autoroutes et routes nationales franciliennes en est l'exemple le plus emblématique.

À cela, il convient d'ajouter les problématiques de pollution lumineuse qui apparaissent çà et là, sources de nuisances visuelles et de consommations électriques inadaptées au réel besoin. C'est en partant de ces constats qu'Eiffage a mis au point Luciole®. L'objectif de ce procédé est de pousser plus

encore l'optimisation des économies d'énergie autorisées aujourd'hui par les LEDs, afin de maintenir un éclairage de qualité tout en permettant une économie sur les budgets de fonctionnement des collectivités locales.

Luciole® allie à la fois :

- Les propriétés photométriques d'un nouveau revêtement routier clair mis en œuvre en faible épaisseur (type BBM à BBTM) ;
- La mise en œuvre de réverbères « intelligents », capables d'adapter la puissance délivrée au réel besoin d'éclairage, tout en maintenant en permanence un éclairage minimum de sécurité.

Luciole® permet ainsi d'éclairer « au juste besoin ». Il fait varier l'intensité lumineuse en fonction de la présence et de la vitesse de déplacement des sujets.

Le piéton pourra ainsi continuer à cheminer en toute sécurité avec un niveau d'éclairage maximal, sans remarquer la moindre différence par rapport à son ressenti actuel, tandis que les véhicules seront intégrés dans un véritable « train de lumière » qui les accompagnera tout au long de leur parcours. Les véhicules étant néanmoins pourvus de phares, le niveau d'éclairage des luminaires pourra être réglé à un niveau intermédiaire.

Mis au point par une approche conjointe des ingénieurs routiers et énergéticiens d'Eiffage, Luciole® est lauréat de l'innovation routière (Comité Innovation Routes et Rues 2017).



C'est une reconnaissance importante qui traduit l'intérêt de la société dans son ensemble pour ce type de solution intégrant à la fois le maintien d'un niveau de service, l'intérêt économique et la diminution des impacts environnementaux (consommation énergétique

1- Réalisation d'un chantier Lumichape.

1- Execution of a Lumichape project.

et réduction de la pollution lumineuse). Les demandes émanant des collectivités sont déjà nombreuses. Luciole® pourrait en effet, selon les estimations, faire fondre leur facture de consommation électrique de 50 % à 70 % selon les réglages, le trafic, etc.

ÉTAT DE L'ART : LE COUPLAGE REVÊTEMENT ROUTIER/ÉCLAIRAGE

Les résultats de plusieurs expériences récentes, dont certaines menées par le groupe « Revêtements et Lumières » de l'Iddrim indiquent que l'optimisation des propriétés photométriques des revêtements de voirie permet de réduire les consommations énergétiques associées à l'éclairage public. Ainsi, il est aujourd'hui reconnu qu'il faut privilégier les teintes claires plutôt que les traditionnels « corps noirs », absorbeurs d'ondes, et éviter les phénomènes de réflexion spéculaire de type miroir au profit des capacités de réflexion diffuse des revêtements, pour optimiser les propriétés photométriques des revêtements de voirie.

Avec le produit Lumichape®, revêtement clair et lumineux mis au point dès l'année 1996, la société Scr Beugnet (aux origines d'Eiffage Route) entendait déjà améliorer la lisibilité de la route et réaliser des économies d'éclairage (figure 1). Lumichape® a notamment fait l'objet d'un suivi par l'État (Setra) dans le cadre de la procédure nationale de Charte Innovation.





© EIFFAGE/WWW.RUBINIPHOT.COM

Les mesures du coefficient S1 avaient été réalisées sur plusieurs sites par le Lrpc de Clermont Ferrand. Le tableau 1 présente les résultats issus de ces mesures, sur des Lumichape® 0/6 et 0/10 et sur un BBTM 0/10 témoin, au jeune âge. Ces valeurs mettent en lumière l'augmentation spectaculaire de la diffusion apportée par le Lumichape® et sa bonne tenue dans le temps. Le certificat fut délivré par le Setra le 5 mars 2001^[2]. Dès lors, cet enrobé s'est développé, et est devenu une référence, notamment en applications sous tunnels (figure 2). En 2011, le projet Lumiroute®, lauréat du Cirr 2011^[3], a permis de redonner un éclairage nouveau à cette problématique du couplage revêtement/installa-

tion d'éclairage. Elle a clairement montré l'intérêt de coupler les technologies d'éclairage LED, de moindre puissance et à longue durée de vie, à des revêtements routiers de teinte claire. L'expérience menée à Limoges a d'ores et déjà permis de démontrer une diminution de l'énergie consommée pour l'éclairage public sur l'axe testé, notamment au regard du témoin réalisé en enrobé « traditionnel », de teinte noire à gris. Luciole® propose aujourd'hui d'aller encore plus loin dans l'optimisation de ces axes de progrès initialement démontrés. La solution Luciole® continue bien évidemment à s'appuyer sur un revêtement routier aux propriétés photométriques

2- Chantier enrobé clair pour tunnel - Tunnel du Chat à Saint-Jean-de-Chevelu 2017.

3- Schéma de principe de l'éclairage intelligent, dynamique et adaptatif.

2- Bright asphalt project for tunnel - Du Chat Tunnel at Saint-Jean-de-Chevelu 2017.

3- Schematic diagram of smart lighting, dynamic and adaptive.

spécifiques (cf. paragraphe « l'enrobé Luciole® ») et sur les économies rendues possibles par la technologie LED. Elle apporte en plus une « intelligence » au système permettant d'ajuster la puissance lumineuse au réel besoin. C'est-à-dire à la maintenir à une intensité nominale assurant un niveau « d'éclairage confort » optimal en présence d'usagers, ces derniers étant détectés et intégrés à distance suffisante en fonction de leur vitesse de rapprochement et d'éloignement, et à la réduire à un niveau minimum de sécurité en l'absence d'usagers (lorsque la rue ou l'axe est désert) (figure 3). Un système de télégestion Luciole® permet en outre de programmer différentes configurations d'éclairage. Il est

SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'ÉCLAIRAGE INTELLIGENT, DYNAMIQUE ET ADAPTATIF



CHANTIERS LUCIOLE® PROGRAMMÉS

L'un des premiers chantiers Luciole® sera réalisé à l'été 2018 sur les bords de Meuse dans la commune de Revin.

Eiffage Route sera en charge de la production et de la mise en œuvre du Béton Bitumineux Très Mince (BBTM) Luciole® sur l'ensemble du quai Quinet, soit 4500 m². Eiffage Énergie Systèmes assurera l'installation et la mise en service de 27 candélabres à LED « intelligents ». Une phase préliminaire d'expérimentation permettra d'optimiser les réglages de l'installation en fonction des configurations du site.

D'autres chantiers Luciole® sont programmés au second semestre 2018, par exemple à Rennes ou à Bruay-la-Buissière.

ainsi possible de moduler la puissance d'un nombre de réverbères variables en fonction de la vitesse de déplacement de l'usager de la voirie : un grand nombre de réverbères pour un sujet rapide (automobiles ou deux roues motorisés), un nombre plus faible pour un sujet plus lent (piéton ou cycliste). Le procédé donne ainsi sa pleine valeur à la notion de « train de lumière » intégrant le sujet à éclairer au fil de son parcours.

L'ENROBÉ LUCIOLE®

L'enrobé Luciole® présente généralement une granularité 0/6 ou 0/10 mm discontinue comparable à celle d'un béton bitumineux très mince ou d'un enrobé phonique (tableau 2). Il réfléchit la lumière de façon diffuse (réflexion multidirectionnelle) grâce à sa composition intégrant des gravillons particuliers de couleur claire. Après sa mise en œuvre, l'enrobé est ensuite soumis à un hydro-décapage qui lui confère alors ses propriétés photométriques optimales, permettant l'installation d'une énergie d'éclairage plus faible et un meilleur confort visuel. À ces propriétés photométriques, l'enrobé Luciole® peut en outre associer une remarquable capacité d'atténuation du bruit de roulement.

Le bitume utilisé est un bitume de la gamme des Biprène®, c'est-à-dire un liant bitumineux modifié aux polymères. Ce liant haute performance apporte une résistance à l'étape d'hydro-décapage de surface et permet d'assurer la durabilité du revêtement à long terme.

CARACTÉRISTIQUES DES LUMINAIRES

Les LED de dernière technologie sont associées à un détecteur automatique de mouvement adaptant l'éclairage de chaque candélabre aux besoins des usagers. La détection de mouvement

peut se faire selon différentes technologies : infrarouge, haute fréquence, analyse vidéo ou effet Doppler. La puissance délivrée est abaissée de 80 % en mode réduit lorsque le système ne détecte aucune présence ou lorsque le choix de la plage horaire a conduit

TABLEAU 1 : MESURES PHOTOMÉTRIQUES RÉALISÉES PAR LE LRPC DE CLERMONT-FERRAND SUR LUMICHAPE®

Classe R	Lumichape® 0/6			Lumichape® 0/10		BBTM
	1 mois	1 an	5 ans	1 mois	1 an	
Âge du revêtement						1 mois
Valeur de S1	0,41	0,35	0,47	0,56	0,45	1,55
Classe de revêtement	R1	R1	R2	R2	R2	R4

TABLEAU 2 : FORMULATION TYPE D'UN BBTM LUCIOLE® 0/8

Gravillon 4/6 Boitron	59%
Granulats spéciaux 5/8	15%
Sable 0/2 Boitron	18%
Filler calcaire	2,5%
Liant Biprène	5,5%

à cette programmation. Cela permet également de réduire la pollution lumineuse.

Un outil de télégestion permet de piloter en temps réel tout ou partie de l'installation pour en maîtriser la consommation. La programmation peut être réalisée au moyen d'un ordinateur portable ou d'une tablette. La mise en place concerne aussi bien des projets neufs que des projets de rénovation.

CONCLUSION

La combinaison entre un revêtement routier clair aux propriétés photométriques optimisées, un éclairage LED et un système associé de gestion intelligent de la mise en puissance est le concept du nouveau procédé Luciole®, primé par le Cirr en 2017.

Dans ce cadre, le Cerema assurera le suivi prochain de planches expérimentales ; suivi qui devrait permettre de confirmer scientifiquement la réduction des consommations d'énergie aujourd'hui calculées.

L'objectif final de Luciole® est bien de permettre à court terme une réduction très sensible (50 à 70 %) des factures des collectivités pour leur éclairage, donc le coût de fonctionnement associé, tout en maintenant le niveau de service et de sécurité voulu par leurs administrés.

Luciole® contribuera également à la lutte contre les pollutions lumineuses, récemment repositionnée comme une priorité par le ministère de l'écologie au vu des nuisances qu'elle génère sur la biodiversité. □

ABSTRACT

LUCIOLE®: SMART LIGHTING, "JUST WHAT IS NEEDED"

FLAVIEN GEISLER, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FRANÇOIS OLARD, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FABIEN MAGRIN, EIFFAGE ENERGIE SYSTÈMES

Public lighting is one of the biggest operating expenses of local authorities, representing about 40% of their electricity bill even though many street lamps often provide lighting all night for just a few pedestrians or vehicles passing from time to time. It was based on this observation that Eiffage developed Luciole®, combining the photometric properties of a new road surfacing and the use of "smart" LED street lamps. Luciole® can provide "just what is needed" for lighting, by automatically varying the luminous intensity depending on the subject's presence and speed of movement: pedestrians will therefore continue to move safely, without noticing the slightest difference compared with their present experience, and vehicles will be included in a real "light stream" which will accompany them throughout their journey. Remote management system, low cost and carbon footprint, longer lifetime, less nocturnal light pollution, these are the major characteristics of Luciole®. Developed through a joint approach by highway and energy engineers at Eiffage, Luciole® was the 2017 winner of the "Roads and Streets Innovation" contest. □

LUCIOLE®: EL ALUMBRADO INTELIGENTE "SEGÚN LAS NECESIDADES"

FLAVIEN GEISLER, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FRANÇOIS OLARD, EIFFAGE INFRASTRUCTURES - FABIEN MAGRIN, EIFFAGE ENERGIE SYSTÈMES

El alumbrado público es una de las partidas de gasto más importantes en el funcionamiento de los entes territoriales, ya que representa cerca del 40% de su factura de electricidad, aunque muchas farolas alumbran toda la noche para el paso esporádico de unos pocos peatones y vehículos. Partiendo de esta constatación, Eiffage ha creado Luciole®, que combina las propiedades fotométricas de un nuevo revestimiento vial y la utilización de farolas con luces LED "inteligentes". Así, Luciole® permite alumbrar "según las necesidades", variando automáticamente la intensidad luminosa en función de la presencia y la velocidad de desplazamiento del sujeto: el peatón seguirá caminando con total seguridad sin percibir la menor diferencia respecto a la situación actual y los vehículos discurrirán por un verdadero "túnel de luz", que los acompañará a lo largo de su trayectoria. Luciole® se caracteriza principalmente por ser un sistema de telegestión con un coste y una huella de carbono reducidos, una mayor vida útil y una menor contaminación luminosa nocturna. Fruto de la colaboración de ingenieros viales y energéticos de Eiffage, Luciole® fue premiado en 2017 en el concurso de innovación vial Innovation Routes et Rues. □



1- Mise en place du béton extrudé sur le parement amont.

1- Placing extruded concrete on the upstream face.

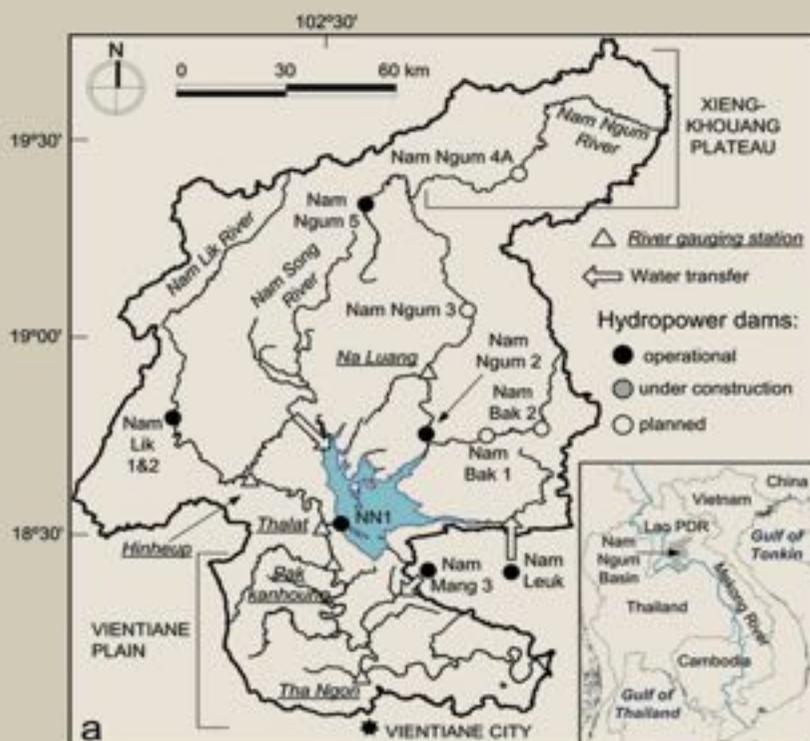
© ARTELIA

AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE NAM NGUM 3 AU LAOS

AUTEURS : XAVIER DUCOS, DIRECTEUR D'ACTIVITÉ BARRAGES, HYDROÉLECTRICITÉ ET INFRASTRUCTURES, ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT - MOHAMED MONKACHI, DIRECTEUR DE PROJET BARRAGES, HYDROÉLECTRICITÉ ET INFRASTRUCTURES, ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT - QUENTIN BERCHER, CHEF DE PROJET BARRAGES, HYDROÉLECTRICITÉ ET INFRASTRUCTURES, ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT

LE PROJET HYDROÉLECTRIQUE DE NAM NGUM 3 AU LAOS COMPORTE UN BARRAGE EN ENROCHEMENTS À MASQUE AMONT DE PLUS DE 210 m DE HAUT, UN RÉSEAU DE GALERIES ET PUIXS D'ENVIRON 12 km DE LONGUEUR ET UNE USINE HYDROÉLECTRIQUE DE 480 MW PERMETTANT DE GÉNÉRER UNE ÉNERGIE ANNUELLE MOYENNE DE 2345 GWh. L'ÉLECTRICITÉ PRODUITE SERA ENTIÈREMENT EXPORTÉE VERS LA THAÏLANDE À TRAVERS UNE NOUVELLE LIGNE DE TRANSMISSION DE 230 kV ET DE 125 km DE LONG SUR LE TERRITOIRE DU LAOS. LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES A COMMENCÉ EN 2013 ET SE POURSUIVRA JUSQU'EN 2021. LE PREMIER GROUPE ENTRERA EN SERVICE EN AOÛT 2021.

AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES



2- Aperçu des aménagements hydroélectriques existants et projetés sur la rivière Nam Ngum et son bassin versant.

2- General view of existing and planned hydroelectric schemes on Nam Ngum River and in its catchment area.

hydroélectriques Nam Ngum 1, 2 et 5 (NN5 étant localisé sur un affluent de la rivière Nam Ngum).

Plusieurs autres projets sont en cours de construction dans le bassin versant, notamment les aménagements Nam Ngum 3 et 4 avec des puissances respectives installées de 480 MW et 240 MW.

Le projet de Nam Ngum 3 est situé environ 50 km en amont de l'aménagement de Nam Pha, et 280 km de la capitale Vientiane par la route.

Le projet est sous la responsabilité d'Électricité du Laos (EDL) ainsi que du gouvernement du Laos. L'énergie produite sera vendue en Thaïlande dans le cadre d'un contrat d'achat d'électricité. ▷

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

L'aménagement hydroélectrique de Nam Ngum 3 (NN3) est situé sur la rivière Nam Ngum au Laos. Cette rivière est un affluent majeur du Mékong.

Elle prend sa source dans la province de Xien Khouang et s'écoule vers le sud à travers la province de Vientiane, rejoignant le fleuve Mékong près de la capitale du Laos, Vientiane. Environ 1 million de personnes vivent dans le

bassin versant de la rivière Nam Ngum dont la superficie est de 16640 km². La rivière a un important potentiel hydroélectrique (figure 2) qui est actuellement en partie exploité avec la construction des aménagements

BARRAGE EN ENROCHEMENTS A MASQUE AMONT (CFRD) GÉNÉRALITÉS

Avec une hauteur de plus de 210 m, le barrage de Nam Ngum 3 sera le plus haut du Laos et parmi les plus hauts barrages CFRD dans le monde. Le parement amont du barrage est incliné de 1v:1,4h. Le parement aval comporte des bermes et a un talus équivalent de 1v:1,5h. La crête du barrage est d'une largeur de 8 m et d'une longueur de 518 m. Le volume total des remblais est de 15 Mm³ (figure 3). Le barrage est construit dans une vallée relativement étroite où la rivière Nam Ngum coule vers le sud entre deux éperons rocheux imposants orientés est-ouest. Ces éperons rocheux sont une des caractéristiques importantes

de ce site et joueront, compte tenu de leur intrusion dans le barrage, un rôle important dans le comportement du remblai et du masque amont en béton.

GÉOLOGIE DU SITE

La géologie du site est constituée principalement des formations suivantes :

- Dépôts de couverture : alluvions et colluvions (d'épaisseur variable).
- Substratum rocheux d'aval en amont :
 - Gneiss (G) - Dévonien ;
 - Quartz mica-schiste (Sch) - Permien ;
 - Mylonite (My) - Permien ;
 - Roches métamorphiques (Met) composées d'une alternance de schiste, quartzite, et de grès silteux - Permien ;

- Roches sédimentaires Terrigènes (Tsr) composées de couches de greywacke, siltstone, schiste et grès caillouteux.
- Géologie structurale :
 - Le contact Met-Sch est constitué par une faille majeure (en aval du barrage). Selon le levé géologique, la faille ne traverse pas la fondation du barrage ;
 - Il n'y a pas d'autres failles importantes à proximité du barrage.

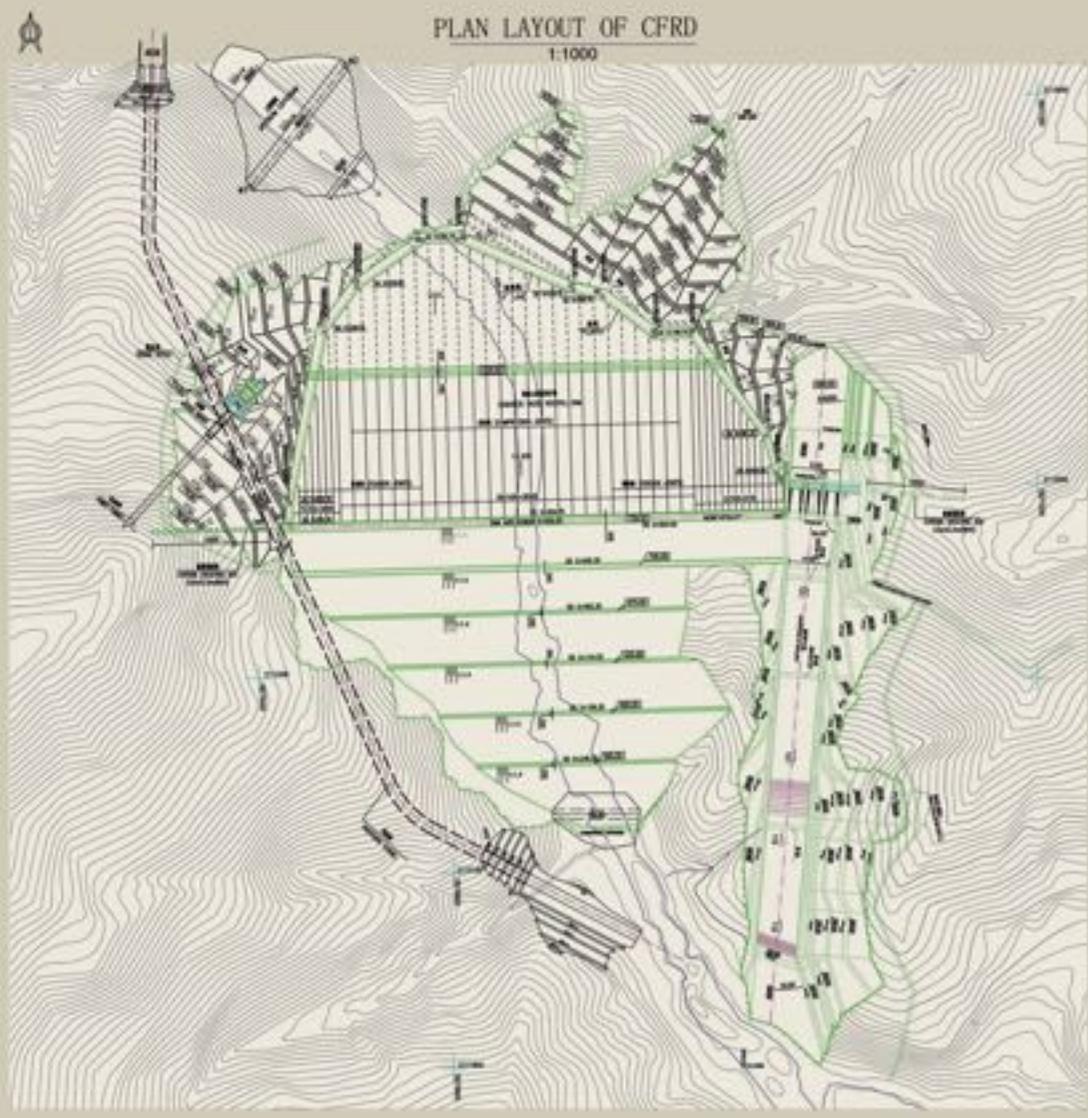
La majeure partie de la fondation du barrage est constituée des formations sédimentaires (Tsr) et métamorphiques (Met). Les directions des discontinuités sont majoritairement E-W et le pendage de direction N (angle de pendage de 60 à 80°). Le traitement de la fondation est défini comme suit :

- Fondation de la plinthe : Excavation des formations complètement altérées (Completely Weathered - CW) et de la moitié supérieure des formations très altérées (Highly Weathered - HW).
- Sur une distance de 0,4 H en aval de la plinthe (H étant la charge d'eau au point considéré) : même principe que pour la plinthe avec des corrections de pente, traitement de joints et de zones de faille.

3- Vue en plan du barrage.

3- Plan view of the dam.

VUE EN PLAN DU BARRAGE



特征点坐标表

点号	点名	X (m)	Y (m)	备注
1	坝顶左角	111200.000	102700.000	
2	坝顶右角	112718.000	102700.000	
3	坝趾左角	111200.000	102000.000	
4	坝趾右角	112718.000	102000.000	
5	上游左角	111200.000	103500.000	
6	上游右角	112718.000	103500.000	
7	下游左角	111200.000	101500.000	
8	下游右角	112718.000	101500.000	
9	坝顶中点	111959.000	102700.000	
10	坝趾中点	111959.000	102000.000	
11	上游中点	111959.000	103500.000	
12	下游中点	111959.000	101500.000	
13	左坝趾	111200.000	102000.000	
14	右坝趾	112718.000	102000.000	
15	左坝顶	111200.000	102700.000	
16	右坝顶	112718.000	102700.000	
17	上游左角	111200.000	103500.000	
18	上游右角	112718.000	103500.000	
19	下游左角	111200.000	101500.000	
20	下游右角	112718.000	101500.000	
21	坝顶左角	111200.000	102700.000	
22	坝顶右角	112718.000	102700.000	

工程特性表

序号	名称	单位	数值	备注
1	坝高	m	210.0	
2	坝顶长度	m	518.0	
3	坝趾长度	m	1518.0	
4	坝底长度	m	1518.0	
5	坝顶宽度	m	8.0	
6	坝趾宽度	m	12.0	
7	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
8	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
9	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
10	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
11	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
12	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
13	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
14	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
15	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
16	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
17	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
18	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
19	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
20	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
21	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
22	坝体填筑量	m ³	15000000.0	
23	坝体填筑量	m ³	15000000.0	

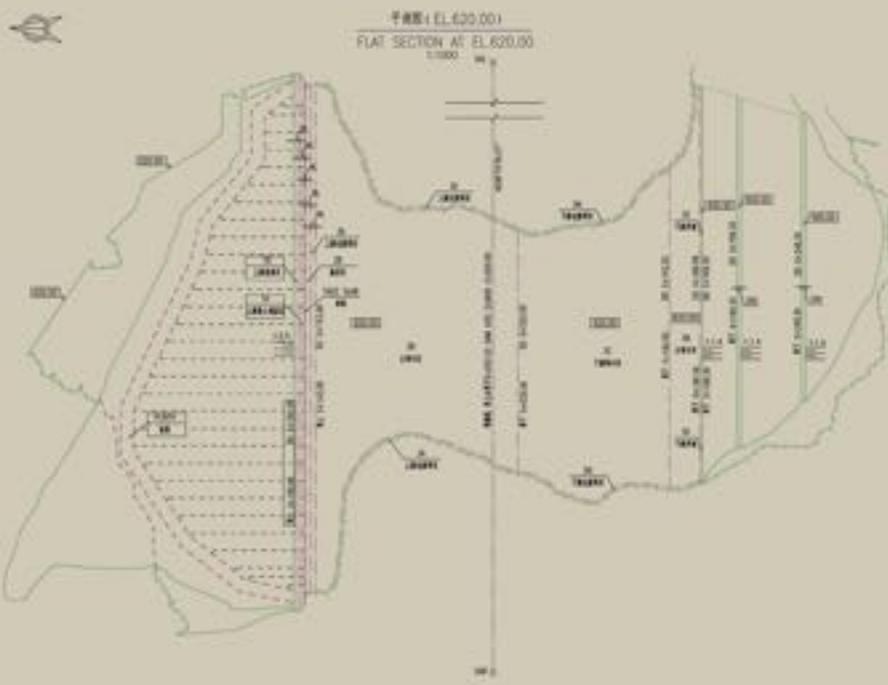
说明 NOTES:

- 除特别说明外，图中尺寸单位为m，标高及高程单位为m。
- CHAINAGES AND ELEVATIONS ARE IN METERS, DIMENSIONS ARE IN CENTIMETERS OR OTHERWISE STATED.

图例

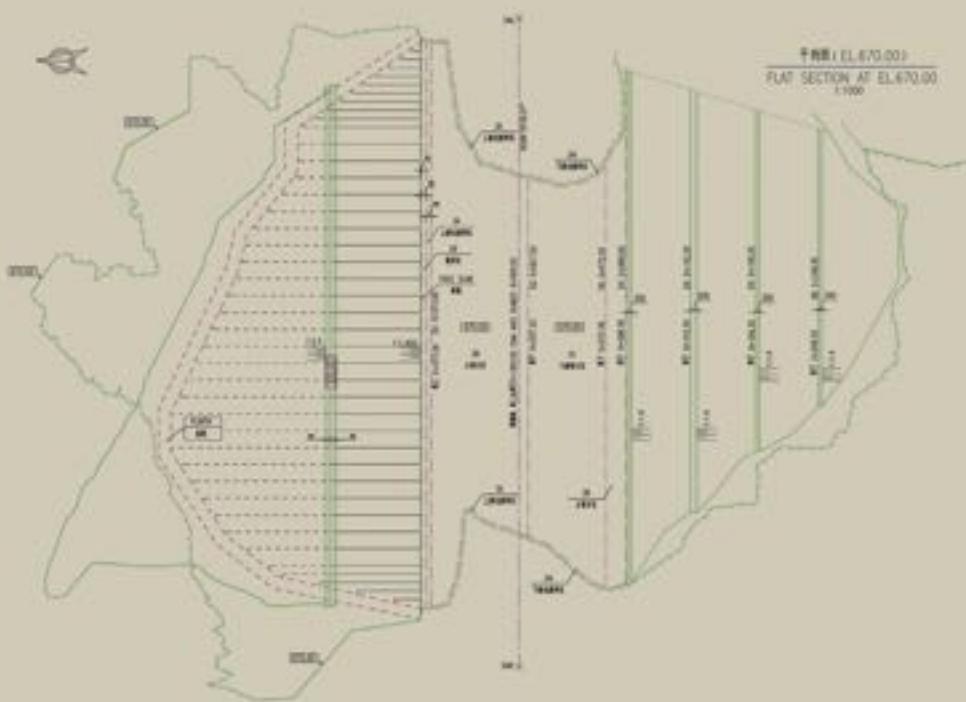
1	坝体	填筑体
2	坝趾	填筑体
3	坝顶	填筑体
4	坝底	填筑体
5	上游	填筑体
6	下游	填筑体
7	左岸	填筑体
8	右岸	填筑体
9	坝体	填筑体
10	坝趾	填筑体
11	坝顶	填筑体
12	坝底	填筑体
13	上游	填筑体
14	下游	填筑体
15	左岸	填筑体
16	右岸	填筑体
17	坝体	填筑体
18	坝趾	填筑体
19	坝顶	填筑体
20	坝底	填筑体
21	上游	填筑体
22	下游	填筑体
23	左岸	填筑体
24	右岸	填筑体

COUPES HORIZONTALES DU BARRAGE À LA COTE 620 m



4a

COUPES HORIZONTALES DU BARRAGE À LA COTE 670 m



4b

→ Fondation du barrage en aval : excavation de la couverture, des formations complètement altérées (CW) et localement de rocher altéré.

GÉOMÉTRIE DU BARRAGE ET SPÉCIFICITÉS DE LA FONDATION

La fondation est irrégulière avec, en particulier, de grands éperons

4- Coupes horizontales du barrage à la cote 620 m (4a) et 670 m (4b).

4- Horizontal cross sections of the dam at elevations 620 m (4a) and 670 m (4b).

rocheux sur les deux rives qui seront englobés dans le remblai, constituant par là-même des points durs dont la rigidité doit être prise en compte lors de l'analyse des déformations du barrage.

Ces éperons apparaissent clairement sur la figure 6 et dans les coupes de la figure 4 et de la figure 5.

Les faces amont des éperons sont excavées de façon à présenter une pente à peu près parallèle au parement amont du barrage, tout en gardant une épaisseur minimale de remblais entre le masque amont et la fondation (environ 13 m en partie basse et 15 m en partie haute).

Il est anticipé que cette forme particulière de la fondation conduira à des tassements différentiels du remblai et à un impact sur les contraintes dans le masque amont en béton, ce qui nécessite une modélisation tridimensionnelle du barrage et des dispositions constructives particulières.

ZONING DU BARRAGE

Le barrage présente une coupe type classique pour ce type d'ouvrage.

Les types de matériaux utilisés d'amont en aval sont les suivants (figure 7) :

- **Zone 2A** : Couche d'appui du masque, 4 m de largeur horizontale. Gneiss ou calcaire sain ou légèrement altéré, D_{max} 80 mm, porosité $n < 17\%$, perméabilité $K = 1 \times 10^{-3}$ à 1×10^{-4} cm/s.
- **Zone 2B** : Matériau fin mis en place en aval du joint périmétral. Gneiss ou calcaire sain ou légèrement altéré, D_{max} 40 mm, porosité $n < 17\%$, perméabilité $K = 1 \times 10^{-3}$ à 1×10^{-4} cm/s.
- **Zone 3A** : Zone de transition entre la couche d'appui du masque et l'enrochement principal du barrage. 4 m de largeur horizontale et, au contact entre l'enrochement principal et la fondation, largeur 1,6 m. Gneiss sain ou légèrement altéré, avec en partie du gneiss, siltstone et grès moyennement altérés. D_{max} 300 mm, $n < 18\%$, $K > 5 \times 10^{-2}$ cm/s
- **Zone 3B** : Enrochement principal. Gneiss sain ou légèrement altéré, gneiss, siltstone et grès moyennement altérés. D_{max} 800 mm, $n < 20\%$.
- **Zone 3C** : Enrochement aval. Gneiss moyennement altéré + max 10% of gneiss très altéré. D_{max} 800 mm, $n < 20\%$.

PLINTHE

La plinthe est fondée sur un rocher considéré comme injectable et non-englobable.

En partie basse, en dessous de la cote 590 m, la largeur de la plinthe est de 10,50 m et son épaisseur de 1 m. Au-dessus de cette cote, en raison d'une charge d'eau moindre, la largeur est de 7 m et l'épaisseur de 60 cm. ▷

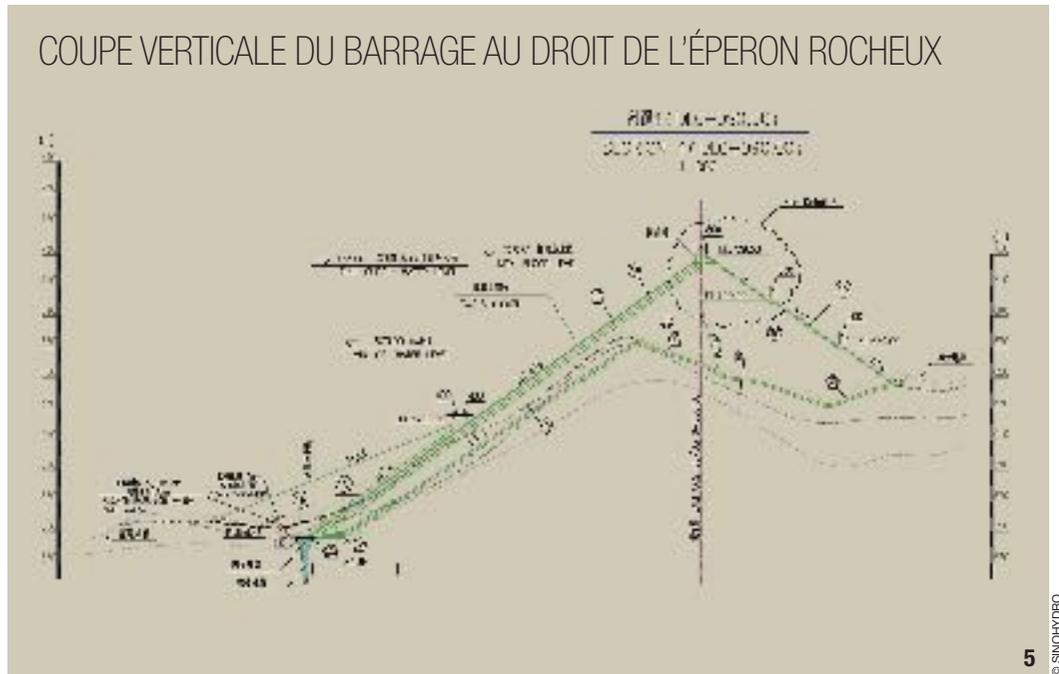
La plinthe est étendue en aval par une dalle en béton armé placée sous le remblai du barrage, de façon à respecter le critère de gradient hydraulique maximal suivant, en fonction de la qualité du rocher d'assise :

5- Coupe verticale du barrage au droit de l'éperon rocheux.

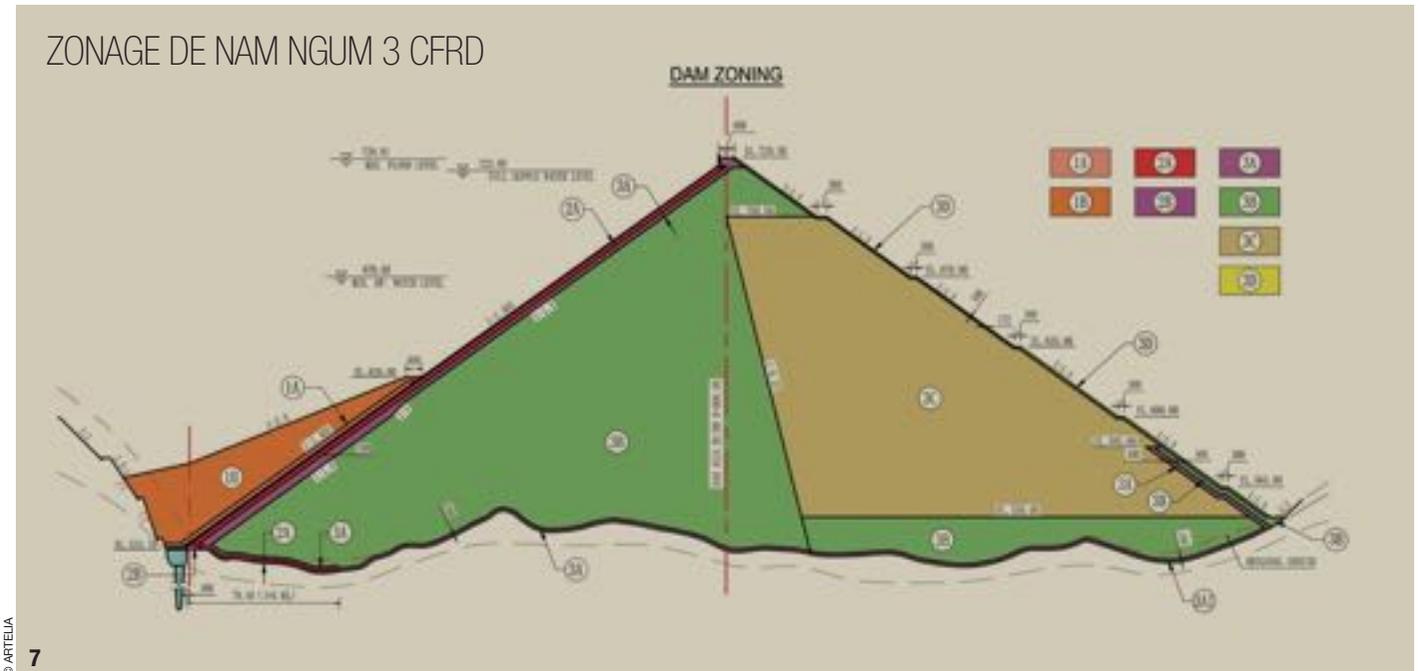
6- Nam Ngum 3 en construction (éperons rocheux sur les rives).

5- Vertical cross section of the dam at the level of the rock spur.

6- Nam Ngum 3 under construction (rock spurs on the banks).



ZONAGE DE NAM NGUM 3 CFRD



© ARTELIA
7

- 20 pour un rocher sain ou légèrement altéré (Slightly Weathered - SW) ;
 - 15 pour la partie inférieure du rocher moyennement altéré (Moderately Weathered - MW) ;
 - 10 pour la partie supérieure du rocher moyennement altéré (Moderately Weathered - MW) ;
 - 5 pour le rocher très altéré (Highly Weathered - HW).
- La plinthe comporte une nappe de ferrailage avec une section forfaitaire de 0,4% de la section de béton dans les

7- Zonage de Nam Ngum 3 CFRD.

8- Vue de la plinthe amont et du remblai amont du barrage.

7- Nam Ngum 3 CFRD zoning.

8- View of the dam's upstream plinth and upstream backfill.

deux directions. Un ferrailage local sera ajouté aux endroits où les calculs montrent une concentration de contraintes ne pouvant pas être reprise par le ferrailage forfaitaire.

MASQUE AMONT

Compte tenu de la hauteur du barrage, l'épaisseur du masque amont est variable. Elle est déterminée par les équations suivantes en fonction de la distance H de la section considérée au sommet du masque :

- Partie centrale du masque : $t = 0,5 + 0,003H$ (exprimé en mètre) ;
- Parties latérales du masque : $t = 0,3 + 0,003H$ (exprimé en mètre).

La partie centrale subissant le plus de contraintes de compression est la plus épaisse. Le masque sera renforcé par une nappe de ferrailage avec une section forfaitaire de 0,4% de la section de béton dans les deux directions. Un ferrailage local contre l'écaillage sera placé au voisinage du joint périmétral et des joints verticaux en compression. Les joints de compression ont une épaisseur de 24 mm ou 50 mm selon leur localisation. Ils sont équipés par un waterstop cuivre en partie basse, et d'un joint caoutchouc en accordéon, un remplissage plastique et une membrane en élastomère EPDM. Les joints de traction ont une conception similaire mais ne sont pas ouverts (figure 9).

CONSTRUCTION DES OUVRAGES

BARRAGE EN REMBLAIS À MASQUE AMONT

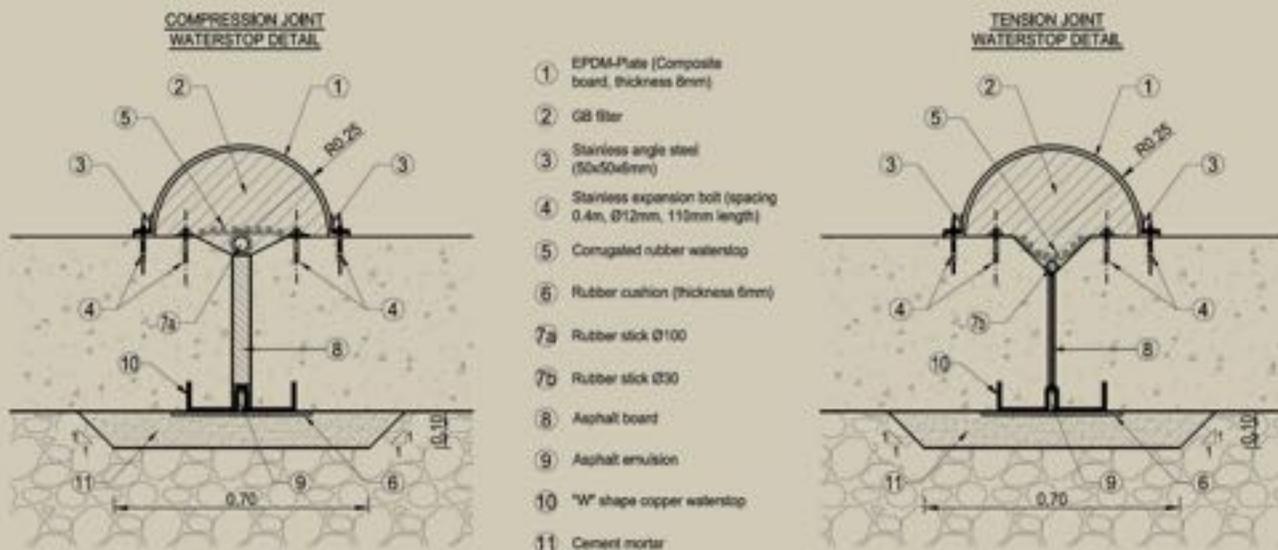
Les travaux de construction ont commencé en septembre 2015 avec l'excavation du barrage en partie haute des rives (pour la plinthe) et le percement du tunnel de dérivation provisoire. Les travaux de dérivation se sont terminés et la rivière a pu être dérivée dans le tunnel en février 2017, après construction du batardeau amont, d'une hauteur de 60 m.

VUE DE LA PLINTHE AMONT ET DU REMBLAI AMONT DU BARRAGE



© ARTELIA
8

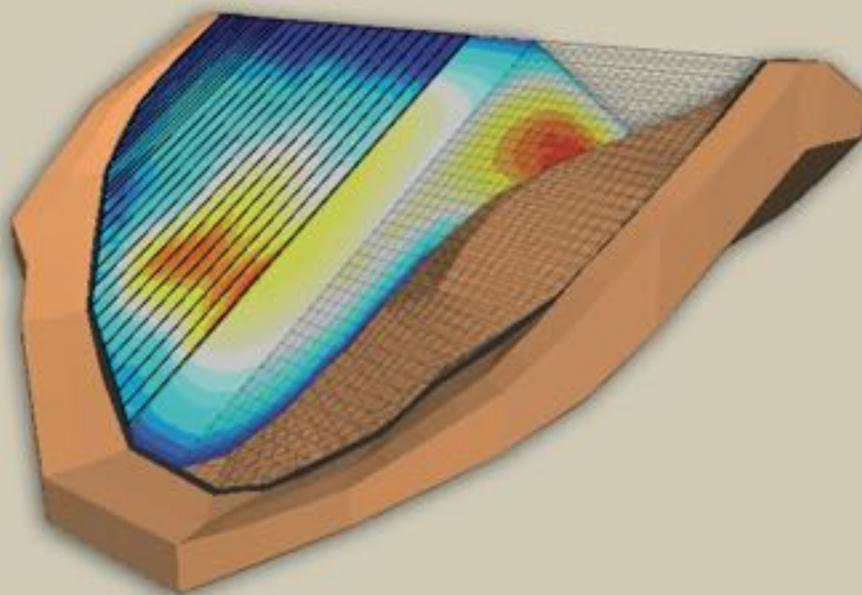
DÉTAILS DES JOINTS WATERSTOP DE COMPRESSION ET DE TRACTION



9

© ARTELIA

MODÈLE 3D DE CONTRAINTES / DÉFORMATIONS DU BARRAGE



10

© ARTELIA

9- Détails des joints waterstop de compression et de traction.

10- Modèle 3D de contraintes / déformations du barrage.

9- Details of the waterstop compression and tension seals.

10- 3D model of dam stresses and strains.

Les travaux d'excavation de la plinthe en fond de vallée se sont achevés en octobre 2017.

Les bétons de la plinthe ont ainsi pu démarrer en novembre 2017.

Le bétonnage de la plinthe est en avance sur les remblais et les injections de consolidation se font au fur et à mesure de l'avancement de la plinthe (figure 8).

Les remblais du barrage sont en cours et ont atteint une hauteur d'environ 40 m et un volume d'environ 1,6 Mm³ (à fin avril 2018).

Les remblais proviennent essentiellement d'une carrière de gneiss situé en aval du barrage. Toutefois, les matériaux fins d'appui du masque (2A) proviennent d'une carrière de calcaire. La mise au point des remblais du barrage a été faite sur la base d'essais de laboratoire sur échantillon réduit (diamètre Ø 300 mm) et d'une planche d'essais exécutée sur site (figure 11). L'épaisseur des couches varie de 23 cm pour la couche fine d'appui du masque (Zone 2A) à 90 cm pour les gros enrochements (Zones 3B et 3C).

Les essais ont démontré que pour obtenir une bonne compacité des remblais, il était nécessaire de compacter en 8 à 12 passes, selon les matériaux, avec un rouleau vibrant lourd de 20 à 26 t (figure 12).

Le compactage près du parement amont se fait au moyen d'un compacteur léger (figure 13).

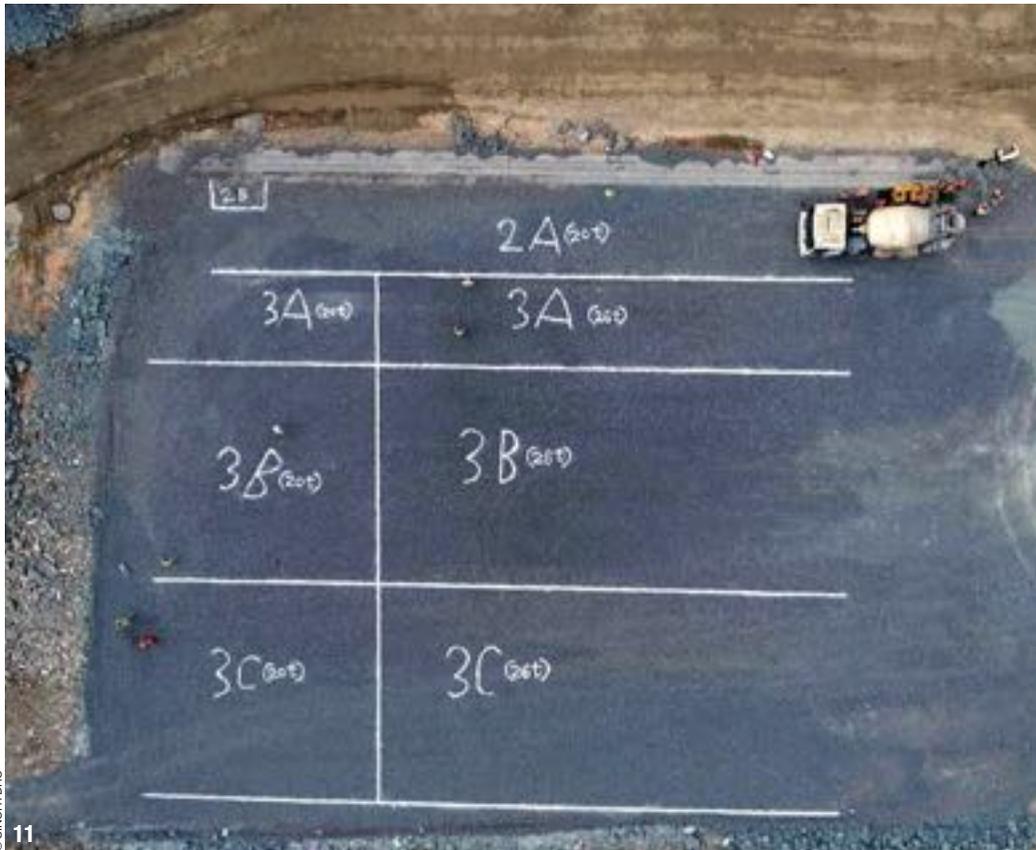
Les densités sèches obtenues sont assez élevées, de l'ordre de 2,3 g/cm³ pour les matériaux 2A et 3A et 2,2 g/cm³ pour les gros enrochements 3B et 3C. La porosité est respectivement

de l'ordre de 16% et 20% (photo 8). Pour protéger la couche fine d'appui du masque en amont du barrage (Zone 2A), un béton extrudé est mis en place au fur et à mesure de la montée du remblai (figure 1).

Chaque couche de remblais est contrôlée au moyen de tests de granulométrie, densité et porosité.

Le barrage est ausculté au moyen de piézomètres, repères de nivellement, tassomètres électromagnétiques, extensomètres horizontaux et télé-niveaux hydrauliques.

Les mesures d'auscultation pendant la construction sont utilisées pour caler un modèle 3D élasto-plastique (figure 10) qui permet d'estimer les déformations du remblai et, de fait, d'anticiper les déformations du masque amont en béton après la mise en eau du barrage.



© SINOHYDRO 11

TUNNELS

Les travaux d'excavation des tunnels ont démarré en janvier 2017. À fin mars 2018, l'avancement était de l'ordre de 62%.

Les tunnels sont exécutés avec la méthode traditionnelle (Drill & Blast). ▷

11- Planche d'essai du compactage des matériaux du barrage.

12- Étalage des matériaux et compactage au rouleau vibrant lourd (vue à partir de la plinthe rive gauche).

11- Dam material compaction test section.

12- Material spreading and compaction by heavy vibratory roller (view from the left-bank plinth).



© ARTELIA 12



13

© ARTELIA

Cinq galeries provisoires d'accès sont prévues le long du tunnel offrant ainsi dix fronts d'attaque en plus des extrémités amont et aval.

Le tunnel traverse différents horizons allant du rocher massif (granite/gneiss) à des grès et siltstones plus ou moins altérés ainsi que des passages calcaires pouvant être karstiques.

Les principales difficultés rencontrées sont dues à la traversée de failles ainsi qu'à la traversée de cavités karstiques avec parfois des venues d'eau importantes. Dans ce cas, le front d'attaque est arrêté pendant plusieurs semaines voire plus d'un mois, le temps de drainer les eaux et renforcer le terrain (essentiellement par injection) avant de reprendre l'excavation.

Selon la qualité du rocher, par ordre de qualité décroissante, le tunnel est soit laissé sans revêtement (avec ou sans ancrages), soit ancré et revêtu de béton projeté ou enfin ancré et revêtu d'un anneau de béton armé.

La partie aval du tunnel, sujette à l'hydrofracturation est blindée. Des essais d'hydrofracturation sont également prévus en quelques zones traversées par le tunnel (points bas) où la contrainte in-situ pourrait ne pas suffire pour contrecarrer la pression d'eau éventuelle provenant du tunnel. Les puits (cheminée d'équilibre et puits en pres-

sion) sont exécutés par la méthode du Raise Borer, avec un forage pilote de 300 mm, puis un réalésage au diamètre de 1,50 m. L'outil de réalésage est montré dans la figure 14.

L'avantage de cette méthode est sa rapidité d'exécution. En effet, après la réalisation du trou pilote et du réalésage, l'excavation du puits au diamètre final peut ainsi se faire sans difficulté, le marinage se faisant simplement en poussant les déblais dans le puits réalésé et en les évacuant par le tunnel en bas du puits.



14

© ARTELIA

13- Compactage près du parement amont.

14- Outil de réalésage du Raise Borer.

13- Compaction near the upstream face.
14- Raise Borer reaming tool.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

BARRAGE :

- Type CFRD
- H = 212 m
- Volume = 15 Mm³

ÉVACUATEUR DE CRUES :

- Évacuateur latéral en béton
- 3 vannes segments (L = 14,5 m ; H = 18 m)
- Crue de projet = 6 472 m³/s
- Crue extrême = 10 024 m³/s

TUNNELS :

- Débit = 180 m³/s
- Tunnel d'amenée de 10 554 m
- Tunnel sous haute pression (35 bars) de 1 623 m

CHEMINÉE D'ÉQUILIBRE :

- Type puits
- H = 240 m
- Ø = 15 m

CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE :

- 3 turbines Francis de 160 MW
- Productible annuel de 2 345 GWh



© ARTELIA

15

CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE

La centrale hydroélectrique, équipée de 3 turbines Francis d'une puissance unitaire de 160 MW, est construite 16,5 km en aval du barrage.

Les travaux de terrassement de cette centrale ont débuté en novembre 2015 et les premiers bétonnages de la fondation ont eu lieu en mars 2018.

L'essentiel des travaux de génie civil de la centrale (béton de 1^{re} phase) sera finalisé en mai 2019 avec la mise en place du pont roulant qui permettra l'installation des équipements électromécaniques.

15- Excavation de la centrale.

15- Excavation of the power station.

La centrale d'une hauteur maximale de 65 m au-dessus de sa fondation et d'une superficie au sol de 3500 m² représente un volume total de béton de 70 000 m³. Cette centrale de conception classique est fondée 20 m sous le

lit de la rivière, sur des schistes sub-verticaux orientés rive-rive. Lors de la réalisation des excavations (figure 15), un déplacement du talus amont a été observé suite à la décompression de ces schistes. À ce jour, des confortements de sécurisation de ce talus par ancrages précontraints sont en cours de réalisation ainsi qu'une étude détaillée du phénomène afin de déterminer les dispositions constructives à mettre en place pour garantir la durabilité de l'ouvrage. Les déformations du talus sont suivies quotidiennement au moyen de repères topographiques et d'extensomètres en forage. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Électricité du Laos (EDL)

ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE ET SUPERVISION DES TRAVAUX : Arteia Eau & Environnement (France)

CONTRACTANT GÉNÉRAL : Sinohydro (Chine)

ABSTRACT

NAM NGUM 3 HYDROELECTRIC SCHEME IN LAOS

ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT : XAVIER DUCOS, MOHAMED MONKACHI, QUENTIN BERCHER

The Nam Ngum 3 hydroelectric power project, with a capacity of 480 MW, is located in Laos and developed by Électricité du Laos (EDL). This project includes one of the largest CFRD type dams in the world, with a height exceeding 210 metres; a side spillway gate; a water path consisting of 11.7 km of tunnel and with a capacity of 180 m³/s; and a hydropower station equipped with 3 Francis turbines. The dam will retain a reservoir of capacity 1.4m m³ and the power station will produce an average annual energy of 2,345 GWh. The development work began in 2015 and start-up is scheduled for 2021. The design and construction of the concrete face of this very high dam are the main challenges of this project. □

PRESA HIDROELÉCTRICA DE NAM NGUM 3 EN LAOS

ARTELIA EAU & ENVIRONNEMENT : XAVIER DUCOS, MOHAMED MONKACHI, QUENTIN BERCHER

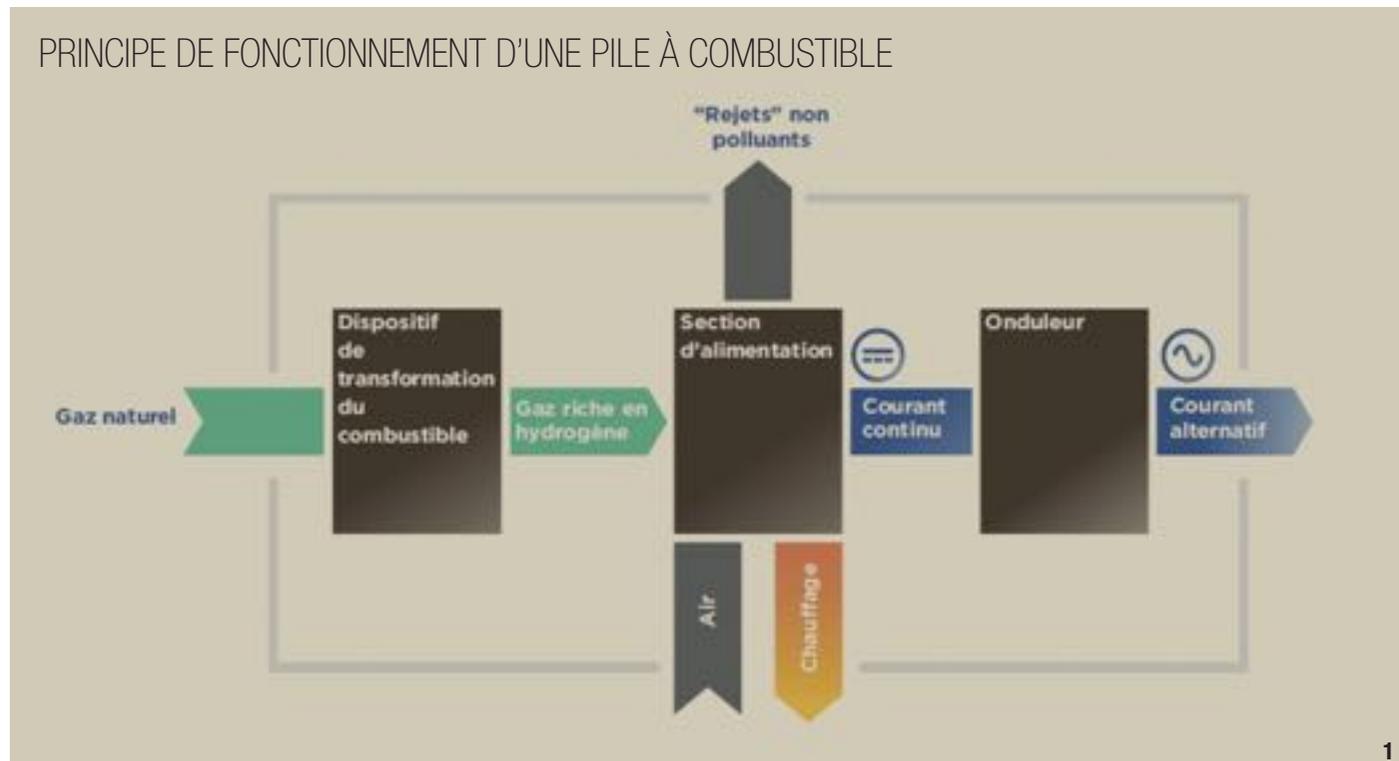
El proyecto hidroeléctrico de Nam Ngum 3 es una instalación de 480 MW de potencia situada en Laos y desarrollada por Électricité du Laos (EDL). Esta instalación es una de las mayores presas del mundo de tipo CFRD, con una altura superior a los 210 m. Dispone de un evacuador de crecidas lateral con válvulas, un paso de agua formado por 11,7 km de túnel y una capacidad de 180 m³/s para abastecer una central hidroeléctrica provista de 3 turbinas Francis. La presa retendrá un embalse de una capacidad de 1,4 Mm³ y la central producirá una potencia anual media de 2.345 GWh. Las obras comenzaron en 2015 y la puesta en servicio está prevista para 2021. El diseño y la construcción de la cara de hormigón aguas arriba de esta presa de gran altura son los principales desafíos de este proyecto. □

EXPÉRIMENTATION D'UNE PILE À COMBUSTIBLE POUR AMÉLIORER LE BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT EXISTANT

AUTEURS : DENIS OHLMANN, THERMICIEN, INGEROP CONSEIL ET INGÉNIERIE - EMMANUELLE RESCH, CHEF DES VENTES ALSACE FRANCHE COMTÉ, GRDF - CHRISTOPH HILDEBRANDT, MANAGING DIRECTOR, RBZ GMBH - DENIS EBNER - THIERRY BESSEY, GROUPE STIHLÉ FRÈRES

DANS LE CADRE D'UN APPEL À PROJET INITIÉ PAR LE PÔLE ALSACE ENERGIE, GAZ RÉSEAU DISTRIBUTION FRANCE (ASSISTÉ D'ENGIE-LAB EX-CRIGEN) FORME AVEC LE CONSTRUCTEUR ALLEMAND DE PILE À COMBUSTIBLE RBZ, L'ENTREPRISE STIHLÉ (INSTALLATION ET MAINTENANCE PERMANENTE) ET INGEROP CONSEIL ET INGÉNIERIE, UN CONSORTIUM POUR MENER UNE EXPÉRIMENTATION DE PILE À COMBUSTIBLE DANS LE BUT D'AMÉLIORER LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT DES SERVICES TECHNIQUES DE M2A - MULHOUSE ALSACE AGGLOMÉRATION. CELA DANS LE CADRE DU PROGRAMME EUROPÉEN ENE.FIELD.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE PILE À COMBUSTIBLE



Le programme ene.field est le plus grand projet pilote européen pour le déploiement et l'analyse du système de micro-cogénération à pile à combustible. Avec la capacité d'atteindre des efficacités globales supérieures à 90 %, les unités de micro-cogénération répon-

dent à la demande de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire (et potentiellement de refroidissement) dans les bâtiments, tout en fournissant de l'électricité pour remplacer ou compléter l'alimentation du réseau. La micro-cogénération peut être utilisée dans les habitations privées, les

1- Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

1- Operating principle of a fuel cell.

bâtiments publics et commerciaux pour fournir une gamme d'utilisations de la chaleur. Ce dispositif permet une réduction de la consommation d'énergie primaire et par conséquent des réductions des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les technologies de micro-cogéné-

CHP system inhouse5000+ - specifications

Specification*	
Fuel cell	LT – PEM
Hydrogen production	steam reformer natural gas, bio methane, (hydrogen, LPG in testing)
electrical power (P_e)	5 kW gross/ 4 kW net
thermal Power (Q_{th})	8 kW
electrical efficiency	28 – 34 %
overall efficiency	85 – 92 %
Inverter:	1-phase / 230 VAC / 50 Hz, grid connected
Degree of protection	System IP42
Heating circuit	max. 50°C / 70°C
Cold start time	ca. 1 h
Power modulation	50% - 100%
Modulation time	ca. 15 min
Dimensions (WxDxH)	(740 x 1550 x 1159) mm



Application

- multi family home
- SME
- Small hotel, restaurant
- Office building
- Canteens, cafeterias

2 © RBZ

ration disponibles dans le commerce sont, dans leur grande majorité, basées sur les technologies du moteur Stirling, du cycle de Rankine organique ou des moteurs à combustion interne (ICE), caractérisées par des rapports chaleur/puissance élevés. Cela les rend plus appropriés pour l'installation dans les bâtiments existants. Les technologies les plus récentes basées sur les piles à combustible ont été lancées sur le marché par le plus grand essai de terrain en Europe, le programme ene.field. La micro-cogénération par pile à combustible (PiàC) est une technologie qui permet de produire de la chaleur et

2- Spécifications techniques de la pile à combustible Rbz du site.

3- Éléments composant la pile à combustible Rbz.

2- Technical specifications of the site's Rbz fuel cell.

3- Components of the Rbz fuel cell.

de l'électricité pour une maison ou un bâtiment de taille intermédiaire à partir d'un seul combustible. Ce dernier est transformé en hydrogène et la pile à combustible utilise ensuite cet hydrogène pour produire de l'électricité et de la chaleur. Les unités sont conçues pour répondre aux besoins en électricité, en chauffage et en eau chaude d'un bâtiment.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est présenté figure 1. Les objectifs principaux du programme ene.field sont de :

- Bénéficier des leçons tirées des essais en conditions réelles ;

- Élaborer des spécifications adaptées à la fabrication en série des produits ;
- Établir une chaîne d'approvisionnement mature et compétitive au niveau de ses membres européens ;
- Fournir des preuves pour faciliter de futures installations.

PRÉSENTATION ET DÉROULEMENT DU PROJET

L'étude du projet a démarré en 2014. La pile à combustible s'intègre dans une installation classique et existante de chauffage du bâtiment des Services techniques de M2A d'une surface utile de 1 232 m² et d'une surface totale de 2 138 m², équipée d'une chaudière à basse température, fonctionnant au gaz naturel et d'une puissance nominale de 260 kW.

La part de la puissance thermique, fournie par la pile, représente 3% (8 kW) de la puissance maximale de la chaudière et permet de maintenir la sollicitation continue de la pile sur toute la saison de chauffe à savoir d'octobre à avril.

Afin d'optimiser son fonctionnement, on monte la pile en série avec la chaudière pour préchauffer l'eau du circuit de retour de la chaudière.

Aucune diminution de consommation de gaz ne sera perceptible, la puissance délivrée par la pile avec son rendement pouvant permettre quasiment de maintenir le rendement initial et global de l'installation.

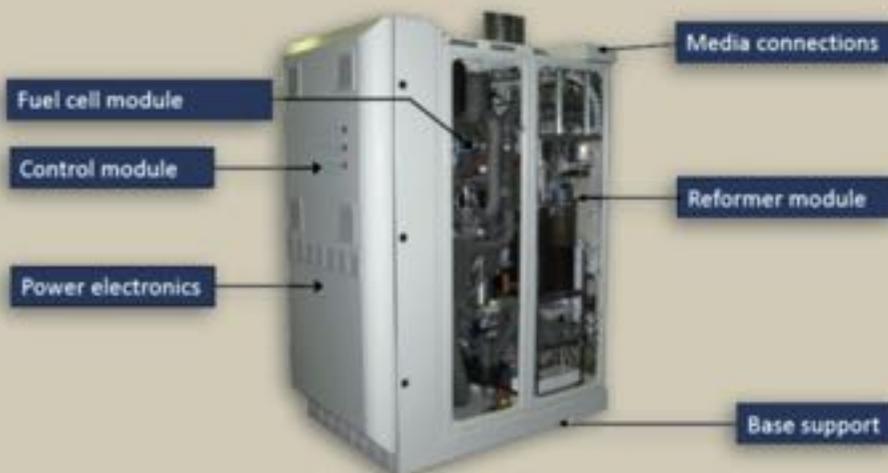
Une différence favorable devrait être perçue sur la facture électrique ; l'objectif de la pile est une production décentralisée d'énergie électrique (4 kW) directement injectée dans l'installation électrique du bâtiment pour y être auto-consommée.

Deux pompes sont installées pour le fonctionnement de la pile à combustible : une pompe primaire permet de charger thermiquement le ballon tampon avec la pile et la pompe secondaire de décharger ce ballon tampon vers le retour de la chaudière.

On identifie quatre scénarios de fonctionnement de chauffage et par conséquent de production d'électricité :

- 1- En été, la chaudière et la pile sont à l'arrêt ;
- 2- La chaudière fonctionne seule si la pile est en défaut (mise en sécurité ou panne ou maintenance) ;
- 3- La pile fonctionne seule en priorité, en début et en fin de saison de chauffe ;
- 4- La pile et la chaudière fonctionnent simultanément.

ÉLÉMENTS COMPOSANT LA PILE À COMBUSTIBLE RBZ



3 © RBZ

Le fonctionnement couplé de ces équipements est repris dans l'analyse fonctionnelle :

- La pile est mise en fonctionnement avec la gestion de sa pompe de charge selon une consigne de température prédéfinie par le fabricant Rbz ;
- Lorsque la pile suffit à couvrir les besoins de chauffage du bâtiment M2A (intersaison/nocturne/week-end), la vanne à trois voies de régulation du retour de la chaudière est maintenue fermée, la décharge du ballon tampon est faite en permanence par la pompe secondaire ;
- La vanne de la chaudière de régulation du retour de la chaudière s'ouvre et le brûleur démarre lorsque, après 5 minutes, l'une des températures de départ des circuits est inférieure à la consigne fixée par la courbe de charge de l'installation.

La pile à combustible de fabrication Rbz, de type inhouse 500+ de technologie PEM (Proton Exchange Membrane), a été mise en service le 2 novembre 2015 (figures 2 et 3).

Les avantages de la pile à combustible, mis en avant par le constructeur Rbz sont les suivants :

- Une économie financière en phase d'exploitation grâce à la production décentralisée d'une partie des besoins de chaleur et d'électricité ;
- Une réduction des émissions de dioxyde de carbone ;
- Une technologie respectueuse de l'environnement (absence de combustion) ;
- L'absence de bruit et de vibrations ;
- Un coût réduit d'installation ;
- Un coût réduit de maintenance.

L'attestation « bâtiment démonstrateur » est obtenue le 16 novembre 2015 suite à une présentation du projet devant le comité de labellisation du pôle de compétitivité Fibres-Energie. Ce comité reconnaît que l'expérimentation constitue une première en France dans un bâtiment tertiaire et qu'elle « contribue à l'élaboration du bâtiment de demain ».

Sur la photo de la chaufferie sur site (figure 4), la pile à combustible est à droite, le ballon tampon inhérent à la pile est au centre et la chaudière existante à gauche.

L'ensemble de cette installation électrique, de chauffage, de gaz est suivie et monitorée par des compteurs d'énergie électrique, de gaz naturel, d'eau de process : les valeurs relevées sont des mesures physiques corres-



4 © CONSORTIUM

pondant au protocole ene.field, les autres valeurs sont des valeurs intrinsèques à la pile Rbz ou des valeurs calculées à partir des mesures :

- Consommation de gaz naturel de la pile (en m³) :
 - Consommation journalière de gaz de la pile (en m³) ;
 - Consommation énergétique de la pile (en kWhgaz).

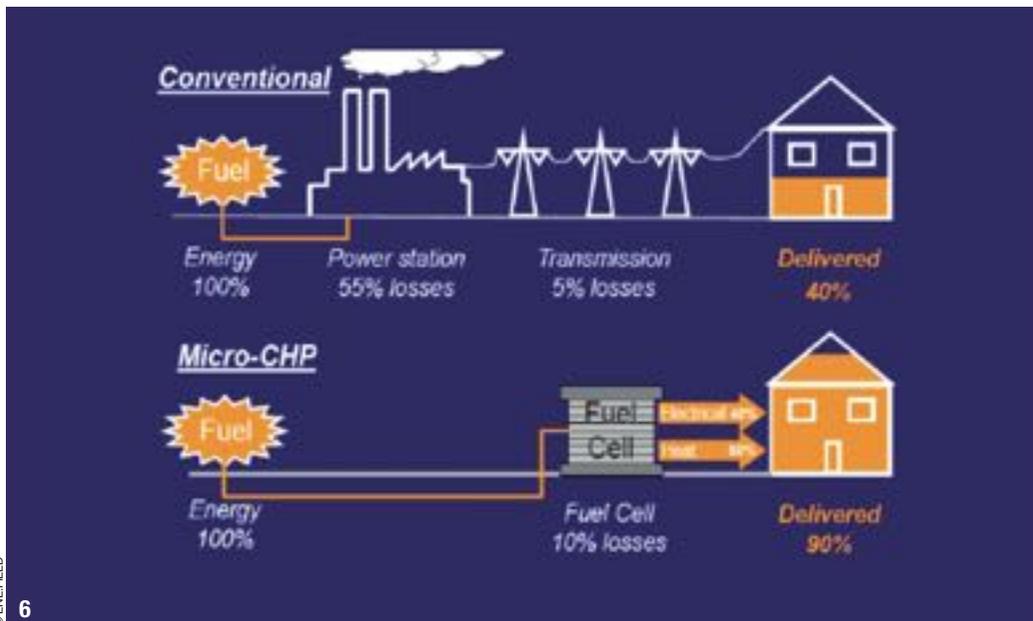
4- Chaufferie du site de l'expérimentation.
5- Synthèse sur 18 mois.

4- Boiler plant at the experiment location.
5- Overview at 18 months.

- Température d'eau de retour de la pile (ind. 45°C).
- Température d'eau de départ de la pile (ind. 60°C).
- Débit d'eau du circuit primaire de la pile (ind. 400 l/h) :
 - Puissance thermique de la pile (ind. maxi = 7500 Wtherm) ;
 - Production de chaleur par la pile en kWhtherm ;
 - Production d'énergie électrique par la pile en kWhélec ;
 - Consommation d'énergie électrique par la pile en kWhélec ;
 - Puissance électrique de la pile (ind. maxi = -5 000 Wélec) ;
 - Hygrométrie extérieure (%HR) ;
 - Hygrométrie intérieure (%HR).
- Consommation électrique du bâtiment en kWhélec :
 - Puissance électrique du bâtiment en Wélec.
- Injection électrique dans bâtiment (mono 240 V) en kWhélec.
- Température extérieure (°C).
- Température intérieure (bureau témoin) (°C).
- Consommation de gaz de la chaudière (en m³) :
 - Consommation de la chaudière (en kWhgaz).
- Température de retour de la chaudière (ind. 45°C).
- Température de sortie de la chaudière.
- Débit d'eau de la chaudière (ind. 11 000 l/h) :

SYNTHÈSE SUR 18 MOIS

		DEC2015	MAI2017	cumul (18 mois)	moyenne mensuelle
PILE À COMBUSTIBLE :					
Consommation de gaz	m ³ /mois	801	475	8 626	446
Consommation de gaz	m ³ /jour	22,7	11,7	21,1	11
Coût énergétique de gaz	€/kWhgaz	4 576	4 177	82 288	4 571
Production de chaleur	kWhtherm/mois	4 953	3 888	49 446	2 748
Rendement de production de chaleur	%	58,3%	45,4%	58,3%	54,3%
Production électrique	kWhélec/mois	2 220	1 278	23 194	1 283
Consommation électrique	kWhélec/mois	9	22	432	26
Rendement de production électrique	%	31,6%	24,5%	37,4%	37,6%
Rendement énergétique total de la PliC	%	89,6%	69,9%	87,8%	87,8%
CHAUDIÈRE :					
Consommation de gaz	m ³ /mois	2 282	411	21 161	1 235
Coût énergétique de gaz	€/kWhgaz	22 552	4 284	215 885	12 727
Production de chaleur	kWhtherm/mois	21 724	3 257	203 544	16 864
Rendement thermique de la chaudière	%	94,3%	94,3%	95,3%	95,3%
BÂTIMENT M2A / PRODUCTION DE CHALEUR :					
Électricité injectée	kWhélec/mois	2 220	2 248	48 220	2 678
Électricité consommée	kWhélec/mois	93,2	73	1 508	89
Électricité injectée/transportée dans réseaux publics	kWhélec/mois	278	18	1 775	99
Électricité injectée/transportée dans réseaux publics	kWhélec/mois	21	31	347	20
Puissance électrique moyenne de bâtiment	kWélec	5,65	4,44	5,28	5,28
Puissance électrique moyenne de la pile	kWélec	2,57	1,63	1,77	1,77
Électricité injectée dans réseau	kWhélec/mois	7,3	6,2	58,5	3,3
Taux d'auto-consommation élec. de l'installation M2A (PliC)	%	98,5%	99,2%	99,2%	99,2%
Taux d'auto-production élec. de l'installation M2A	%	47,2%	24,3%	38,8%	38,8%
Taux de couverture élec. de l'installation M2A (PliC)	%	52,3%	35,2%	33,3%	33,3%
Rendement éner. (therm+élec) global de système	%	94,75%	91,65%	93,43%	93,63%
Rendement éner. global de système en EP	%	96,52%	92,52%	94,54%	94,54%
Production de chaleur	kWhtherm/mois	29 777	7 942	283 918	16 612
Taux de couverture de chauffage par PliC	%	35,7%	44,6%	34,8%	34,8%
Rendement total de la production de chaleur	%	82,3%	78,7%	84,8%	84,8%



6- Comparaison schématique des pertes énergétiques des deux modes.

7- Bilan et ratios.

6- Schematic comparison of energy losses for the two modes.
7- Balance and ratios.

- Puissance thermique de la chaudière (ind. maxi = 260 000 W_{therm}) ;
- Production de chaleur de la chaudière en kWh_{therm}.

Ces relevés, faits en continu toutes les 15 minutes, soit près de 75 000 valeurs par mois, et livrés par Dbi pour ene.field et Rbz, constituent les données d'entrée des synthèses des informations de l'ensemble des équipements énergétiques producteurs et consommateurs du bâtiment considéré comme un système énergétique à part entière. Une compilation des relevés est produite mensuellement.

Le monitoring s'est étendu sur une durée de 18 mois depuis décembre 2015 jusqu'à l'arrêt estival du chauffage en mai 2017.

La synthèse et la compilation des valeurs et des mesures physiques sur cette période sont caractérisées sous la forme d'un tableau (figure 5).

Dans le cadre de la transition énergétique, l'expérimentation se donne pour objectif de vérifier concrètement et en conditions réelles, l'évolution des consommations énergétiques avec autoconsommation électrique et thermique pour les usages du bâtiment M2A ; ceci avant et avec l'installation de la pile à combustible, comme représenté sur le schéma figure 6.

RÉSULTATS

Après 18 mois de fonctionnement, les indicateurs principaux caractérisant la Pile à combustible (PiàC) et l'installation du bâtiment M2A sont les suivants :

- Rendement moyen de production de chaleur de la PiàC : 58 % ;
- Taux moyen de couverture du chauffage (PiàC) : 14 % ;
- Rendement moyen de production électrique de la (PiàC) : 28 % ;
- Taux moyen d'auto-consommation électrique de l'installation (PiàC) : 90 % ;

BILAN ET RATIOS

Comparatif		Avant (moyen)	Après	Différence	
ELEC	kWh/an	53 663	38 487	-15 176	
	kWh/m ² SU.an	43,6	31,2	-12,3	
	kWh/m ² STOTALE.an	25,1	18,0	-7,1	
	%	100%	71,7%	-28,3%	
	CO2 (kg/an)	9 659	6 928	-2 732	
	moy. kWh/mois	4 472	3 207	-1 265	
	moyenne €TTC/an	7 646 €	6 432 €	- 1 213 €	
	€ TTC/m ² SU.an	6,2 €	5,2 €	-1,0 €	
	€ TTC/m ² STOTALE.an	3,6 €	3,0 €	-0,6 €	
	%	100%	84,1%	-15,9%	
moy. €TTC/mois	637 €	536 €	- 101 €		
GAZ	kWh/an	234 842	233 826	-1 016	
	kWh/m ² SU.an	190,6	189,8	-0,8	
	kWh/m ² STOTALE.an	109,8	109,4	-0,5	
	%	100%	99,6%	-0,4%	
	CO2 (kg/an)	55 657	55 417	-241	
	moy. kWh/mois	19 570	19 486	-85	
	moyenne €TTC/an	15 004 €	14 814 €	- 190 €	
	€ TTC/m ² SU.an	12,2 €	12,0 €	-0,2 €	
	€ TTC/m ² STOTALE.an	7,0 €	6,9 €	-0,1 €	
	%	100%	98,7%	-1,3%	
moy. €TTC/mois	1 250 €	1 234 €	- 16 €		
		Avant (moyen)	Après	Différence	Différence corr. DJU
ELEC+GAZ	€TTC/an	22 650 €	21 246 €	- 1 404 €	- 2 594 €
	€ TTC/m ² SU.an	18,4 €	17,2 €	-1,1 €	-2,1 €
	€ TTC/m ² STOTALE.an	10,6 €	9,9 €	-0,7 €	-1,2 €
	%	100%	93,8%	-6,2%	-11,5%
	CO2 (kg/an)	65 317	62 944	-2 972	-6 466
	€TTC/mois	1 887 €	1 771 €	- 117 €	- 216 €

- Taux moyen d'auto-production électrique de l'installation M2A : 29 % ;
- Taux de couverture électrique de l'installation M2A (PiàC) : 33 % ;
- Rendement énergétique global de la PiàC : 86 %.

En valeurs énergétiques et après 18 mois de fonctionnement, les indicateurs sont les suivants :

- Production de chaleur de la PiàC : 50 MWhtherm ;
- Production de chaleur de M2A : 353 MWhtherm ;
- Production électrique de la PiàC : 23 MWhélec ;
- Électricité importée par M2A depuis le réseau électrique public : 48 MWhélec ;
- Électricité injectée par M2A dans le réseau public et produit par la PiàC : 1,8 MWhélec ;
- Consommation électrique par la PiàC : 0,45 MWhélec.

Ces résultats sont probants et aussi améliorables sur des périodes de fonctionnement en saison froide (novembre à mars) et en inter-saison (octobre et avril), d'une part, en harmonisant encore mieux l'auto-production électrique de la pile à l'auto-consommation du bâtiment (profil électrique hebdomadaire de pilotage adapté) et, d'autre part, avec une pile à combustible aux composants fiabilisés par le constructeur.

PERSPECTIVES

L'objectif était de vérifier l'évolution des consommations énergétiques (gaz et électricité) par l'ensemble des usages du bâtiment M2A avant et avec l'installation de la pile à combustible de manière à établir une tendance de bilan énergétique et économique.

Sur la base des consommations énergétiques relevées sur les factures

d'électricité et de gaz et en s'appuyant sur les suivis des consommations depuis la mise en service de la PiàC en novembre 2015, un premier bilan énergétique a été réalisé en comparant les périodes de fonctionnement de l'installation.

De même sur la base de ces factures d'électricité et de gaz et selon les suivis depuis la mise en service de la PiàC en novembre 2015, un premier bilan économique a été effectué en comparant également les deux périodes correspondantes.

Le bilan observé pour le bâtiment M2A est le suivant :

→ L'économie énergétique réalisée est significative, avec un gain annuel de 6,2 % ; si l'on tient compte de la différence de rigueur climatique entre les deux périodes de comparaison, en tenant compte des DJU (Degrés Jour Unifiés) de la période de référence, cette économie annuelle représenterait un gain de 11,5 % à profil climatique identique.

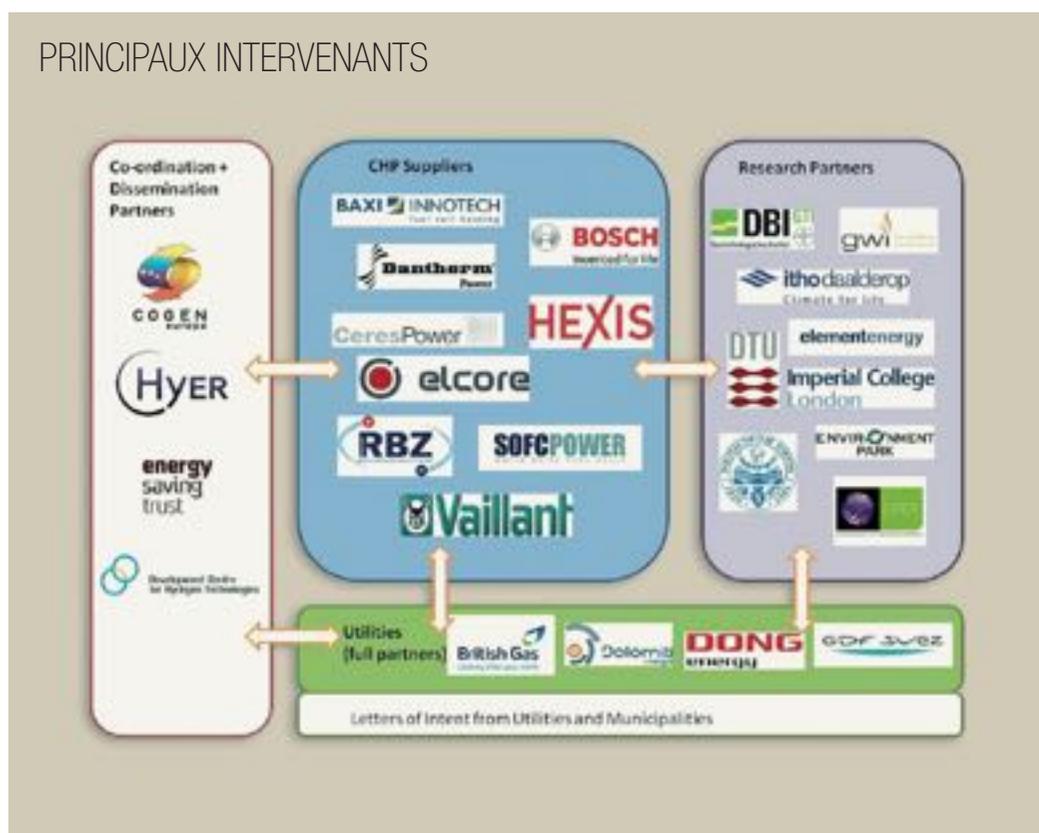
→ La diminution annuelle de l'importation d'énergie électrique depuis le réseau public est de 29 %.

→ La consommation annuelle de gaz naturel est quasiment inchangée.

S'agissant du bilan environnemental, la réduction d'émission de dioxyde de carbone est d'environ trois tonnes par an ; rapportée aux DJU de la période de référence cette réduction dépasserait six tonnes à profil climatique identique.

Le figure 7 illustre, à l'aide de ratios, ce bilan du bâtiment M2A avant et avec l'installation de la pile.

Lors de la prochaine expérimentation, ces caractéristiques devront être suivies de manière à pouvoir encore les améliorer : évolution vers le haut des taux moyens et des rendements, évolution des valeurs énergétiques. □



ABSTRACT

EXPERIMENTING WITH A FUEL CELL TO IMPROVE THE ENERGY BALANCE OF AN EXISTING BUILDING

D. OHLMANN, INGEROP CONSEIL ET INGÉNIERIE - E. RESCH, GRDF - C. HILDEBRANDT, RBZ GMBH - D. EBNER - T. BESSEY, GROUPE STIHLE FRÈRES

The fuel cell experiment performed within the framework of the ene.field programme and the Energy Transition Plan of Mulhouse Alsace Agglomération, to improve the energy balance of an existing service sector building, requires motivated, experienced partners, linked by this common goal and in a relationship of perfect trust. With 11.5% energy savings and a 29% annual reduction in electric power imported from the public grid, this experiment proved conclusive in terms of experience feedback for each of the participants, and also confirmed the benefits of such an energy system producing heat and electricity. □

ENSAYO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PARA MEJORAR EL BALANCE ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO EXISTENTE

D. OHLMANN, INGEROP CONSEIL ET INGÉNIERIE - E. RESCH, GRDF - C. HILDEBRANDT, RBZ GMBH - D. EBNER - T. BESSEY, GROUPE STIHLE FRÈRES

El ensayo de pila de combustible realizado en el marco del programa ene.field y del plan de transición energética de la agrupación de municipios Mulhouse Alsace Agglomération para mejorar el balance energético de un edificio de servicios existente exige la implicación de socios motivados, experimentados y unidos por este objetivo común y en perfecta relación de confianza. Con un ahorro energético del 11,5% y una reducción de la importación anual de energía eléctrica desde la red pública del 29%, este ensayo ha resultado revelador en términos de feedback para cada uno de los participantes, al tiempo que confirma el interés de este tipo de sistemas energéticos que producen calor y electricidad. □

PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€

VILLE ET PATRIMOINE

927



OUVRAGES D'ART

+ SUPPLÉMENT "SPÉCIAL 100 ANS" OFFERT

932



TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

937



INTERNATIONAL

928



SOLS ET FONDATIONS

933



SPÉCIAL GRAND PARIS

938



GARES & STATIONS

929



SPÉCIAL BIM 2

934



TRAVAUX SOUTERRAINS

939



TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

930



VILLE ET PATRIMOINE

935



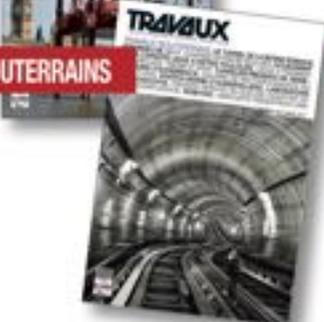
OUVRAGES D'ART

940



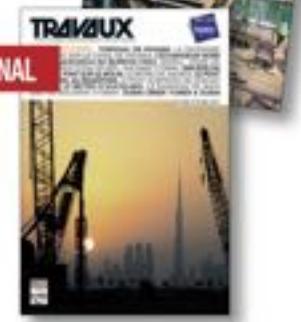
TRAVAUX SOUTERRAINS

931



INTERNATIONAL

936



SPÉCIAL INNOVATION

941



BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : Com et Com - Service Abonnements TRAVAUX - Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22 - Fax : +33 (0)1 40 94 22 32 - Email : revue-travaux@cometcom.fr

JE COMMANDE LES NUMÉROS SUIVANTS (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

- 927 x 932 x 937 x
 928 x 933 x 938 x
 929 x 934 x 939 x
 930 x 935 x 940 x
 931 x 936 x 941 x

Soit un montant total de : _____ numéros x 15 € = _____ €

(Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 15 € à 13 € l'unité)

*Offre valable jusqu'au 31/12/19 et hors frais port (exemple pour un numéro : 5,00€ d'envoi France, 12,00€ d'envoi Europe et 12,50€ d'envoi étranger hors Europe). Conformément à la Loi « Informatique et des libertés » du 06/01/78, le droit d'accès et de rectification des données concernant les abonnés peut s'exercer auprès du service abonnements. Ces données peuvent être communiquées à des organismes extérieurs. Si vous ne le souhaitez pas, veuillez cocher cette case

JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :

Nom _____ Prénom _____

Entreprise _____ Fonction _____

Adresse _____

Code postal [] [] [] [] [] [] Ville _____

Tél. : _____ Fax : _____

Email : _____ Merci de ne pas communiquer mon adresse mail

Je joins mon règlement d'un montant de _____ € TTC par Chèque à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés exclusivement à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE

- Je réglerai à réception de la facture
 Je souhaite recevoir une facture acquittée

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire



1- Installation
de la nacelle.

1- Installation
of the nacelle.

© GEOSEA

LES ÉOLIENNES OFFSHORE - DÉVELOPPEMENT ET THÉMATIQUES DES FONDATIONS

AUTEUR : EMILIO NICOLINI, GÉRANT ET DIRECTEUR DE L'INGÉNIERIE, CATHIE ASSOCIATES S.A.R.L.

DANS LE SECTEUR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, LE DÉVELOPPEMENT DES CHAMPS ÉOLIENS OFFSHORE S'EST ACCÉLÉRÉ PENDANT LA DERNIÈRE DÉCENNIE. L'INDUSTRIE ÉOLIENNE EN EUROPE EST DE LOIN LA PLUS DÉVELOPPÉE AU MONDE, TANT EN NOMBRE DE TURBINES INSTALLÉES QUE DE PUISSANCE CUMULÉE (15,8GW, FIN 2017). LES AMÉLIORATIONS APPORTÉES AUX TURBINES, AUX STRUCTURES ET AUX FONDATIONS, ONT CONTRIBUÉ À L'ESSOR DE LA PUISSANCE INSTALLÉE. CATHIE ASSOCIATES, BUREAU D'ÉTUDES SPÉCIALISÉ EN GÉOTECHNIQUE, EST À LA POINTE DE L'EXPERTISE DANS LE SECTEUR DES FONDATIONS OFFSHORE POUR L'ÉNERGIE.

CROISSANCE DE L'ÉNERGIE PRODUITE À PARTIR DE SOURCES ÉOLIENNES OFFSHORE



© WINDEUROPE

2

Pour mesurer l'évolution de la production d'énergie éolienne offshore, il est utile de se référer aux données économiques.

Des études récentes résumant très bien la tendance 2017 et fournissent des prévisions pour 2018 et les années suivantes.

Selon l'étude de WindEurope, association des acteurs du secteur, la capacité de production de l'énergie éolienne offshore a connu, dans les deux der-

2- Croissance de l'énergie produite à partir de sources éoliennes offshore.

2- Growth in energy produced from offshore wind power sources.

nières décennies, une croissance exponentielle (figure 2).

La capacité à fournir une quantité d'énergie aussi importante résulte du développement de l'industrie pour la production, l'installation et l'entretien des champs éoliens en exploitation. À l'échelle mondiale, l'éolien offshore européen est le plus développé, avec le Royaume-Uni et l'Allemagne en tête, affichant 43 % et 34 % de la capacité de production

mondiale ; ensuite, viennent le Danemark, les Pays-Bas et la Belgique avec respectivement 8 %, 7 % et 6 %. Malheureusement, la production éolienne offshore française est toujours très réduite, avec environ 2 MW de capacité installée. Et ce malgré une production d'énergie éolienne terrestre bien développée (avec 13,5 GW installés fin 2017) et ce bien que les premiers pas formels de la France en matière d'éolien offshore remontent à 1990 !

La première campagne d'appel d'offres offshore (« Round 1 ») a été lancée en 2011, pour 5 sites sélectionnés sur les côtes françaises, dont seuls 4 seront finalement attribués : Fécamp, Courseulles-sur-Mer, Saint-Brieuc et Saint-Nazaire. Un processus similaire sur la période 2013-2015 a abouti à l'attribution de deux sites supplémentaires : le Tréport et l'Île d'Yeu-Noirmoutier.

Les champs éoliens répertoriés jusqu'à présent sont représentés très schématiquement sur la figure 3.

Pour différentes raisons, aucun parc éolien n'a encore été activé en France et, par conséquent, l'ensemble de la chaîne industrielle française souffre de ce retard important par rapport aux autres pays européens. À ce jour, une seule installation d'essai flottante (le « démonstrateur » Floatgen de la société Ideol) a été implantée, pour une capacité de 2 MW.

Si cette puissance est comparée à celles disponibles et en production offshore au Royaume-Uni et en Allemagne, soit 6835 MW et 5355 MW au total fin 2017, l'étendue du retard apparaît clairement. Et ce en dépit de conditions favorables en France, tant du point de vue des fonds marins que de la persistance et de l'intensité du vent, et très similaires à celles des deux leaders européens (Royaume-Uni et Allemagne). Il convient d'ajouter que le secteur industriel français dans son ensemble, tant en termes de capacités de production que de moyens d'installation et de compétences techniques, serait pleinement capable de poursuivre le développement complet des parcs éoliens jusqu'ici à peine entamé. Le thème du développement de l'éolien offshore en France fait encore l'objet d'un débat nourri entre partisans et opposants, mais marque indubitablement une étape jusque-là ratée dans le développement énergétique français. Bien que le pays soit reconnu comme abritant le deuxième gisement d'énergie éolienne en Europe.

LA STRUCTURE D'UN PARC ÉOLIEN OFFSHORE

La mise en service d'un parc éolien offshore passe par la conception, la construction et l'installation d'un complexe technique constitué de trois éléments principaux :

- Les turbines ;
- La sous-station électrique de transformation ;
- Les câbles qui relient chaque turbine à la sous-station et celle-ci au réseau électrique à terre.

Chacun de ces éléments interagit avec le fond marin, et fait donc l'objet d'études d'ingénierie dans lesquelles la géotechnique et les fondations jouent un rôle essentiel. Le développement des fondations éoliennes s'est inspiré de l'expérience acquise dans le secteur pétrolier offshore depuis les années 1970.

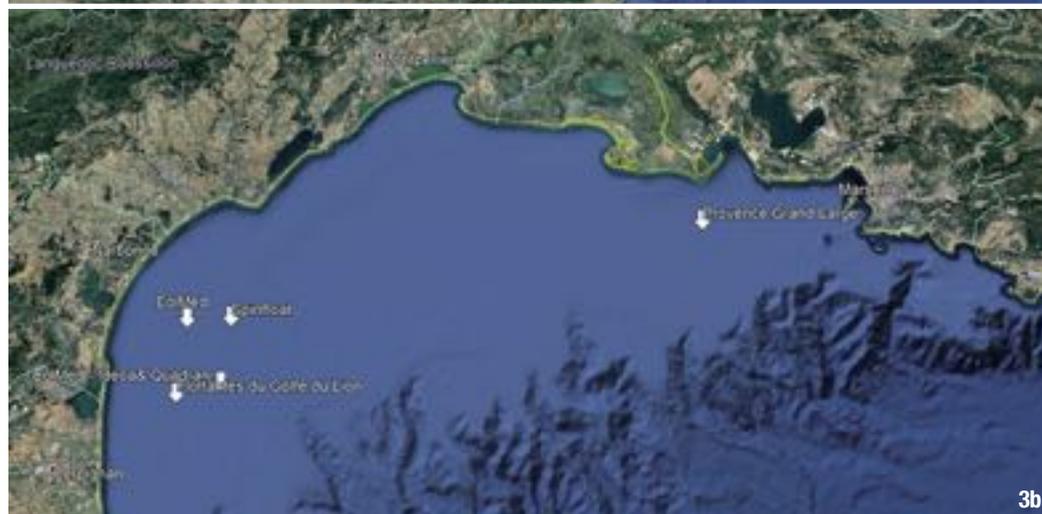
Sur ces bases, l'industrie éolienne offshore a dû investir dans le développement d'une série de méthodologies propres qui se sont traduites par des innovations en particulier pour les fondations. Cet effort de recherche a permis à l'ingénierie géotechnique européenne de rester à la pointe de l'innovation.

Cathie Associates s'est montrée depuis 2005 particulièrement active dans ce domaine et elle est aujourd'hui reconnue comme l'une des sociétés d'ingénierie géotechnique en France et



3a

© CATHIE ASSOCIATES - AVEC GOOGLE EARTH



3b

© CATHIE ASSOCIATES - AVEC GOOGLE EARTH

en Europe ayant le plus contribué à la formation des connaissances et au développement des fondations en mer pour l'énergie éolienne.

Pour en revenir à l'histoire de l'énergie éolienne marine, il faut rappeler combien la puissance des éoliennes a augmenté au fil du temps.

Les premières turbines, d'une puissance de 1 à 2 MW pour les applications des années 1980 et 1990, sont aujourd'hui dépassées par des

3- Plan des éoliennes en mer françaises.

3- Map of French offshore wind turbines.

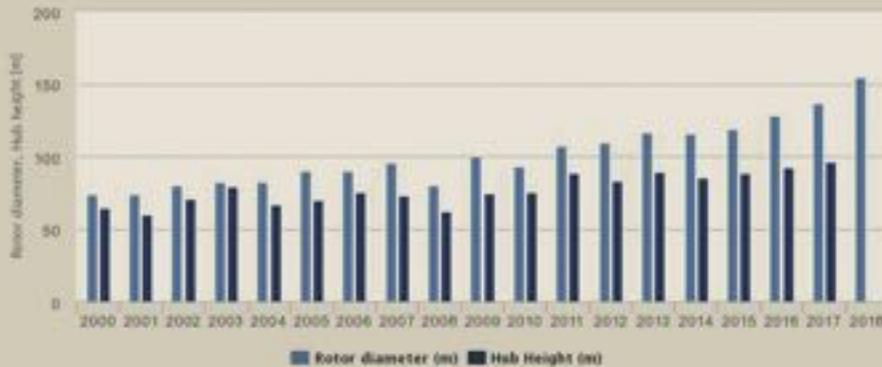
turbines de 9 MW (MHI Vestas Offshore Wind) et dans un futur proche de 12 MW de puissance chacune (projet Haliade X de General Electric).

Les dimensions sont aussi en croissance, avec des pales longues jusqu'à 80 m pour les projets en cours et 107 m pour le rotor GE Haliade X.

Avec des pales et des rotors de telle dimension, la hauteur au-dessus du niveau moyen de la mer doit être largement augmentée afin d'éviter toute

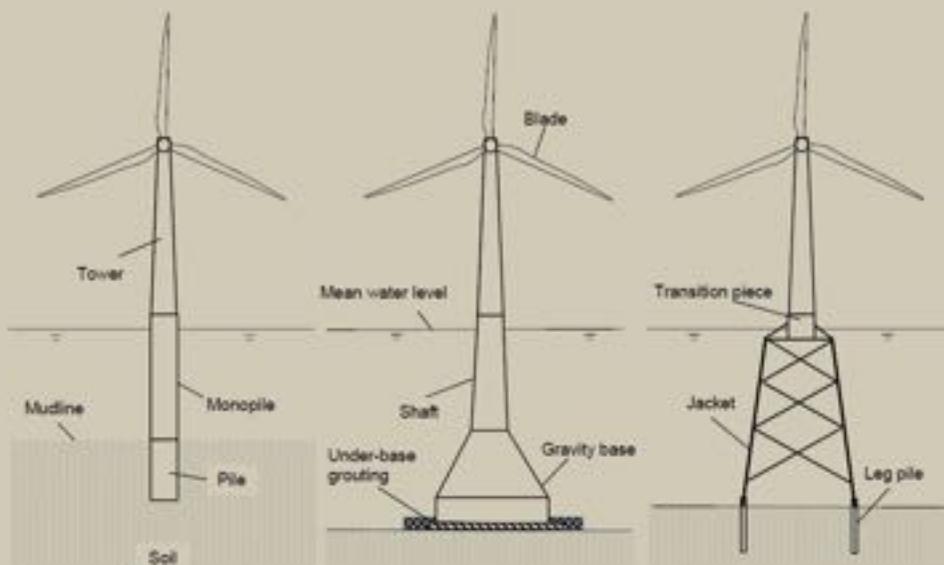
machines de 6 à 8 MW en utilisation courante ; de récentes publications signalent des projets en cours sur des

ÉVOLUTION DE LA TAILLE DES TURBINES ÉOLIENNES OFFSHORE



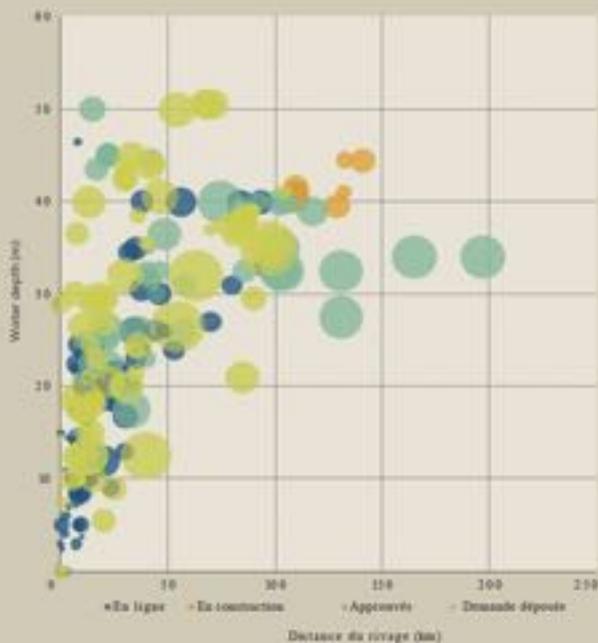
4

STRUCTURE D'UNE ÉOLIENNE POSÉE OFFSHORE



5

PROFONDEUR D'EAU ET DISTANCE DU RIVAGE MOYENNES DES ÉOLIENNES POSÉES



6

interférence avec la surface de l'eau ; les "nacelles" doivent ainsi être maintenues à des hauteurs considérables, de l'ordre de 70 m environ et jusqu'à plus de 90 m pour les structures récentes des turbines les plus puissantes (figure 4).

Une tour éolienne est composée de trois éléments : la tour, composée d'un tube métallique de grand diamètre (4 à 6 m) ; le rotor (siège de la mécanique et de l'alternateur), au sommet de la tour ; enfin les pales reliées au rotor. Dans les modèles utilisés aujourd'hui, l'axe de rotation du rotor est horizontal, même si des projets existent (au stade de prototype) avec un axe de rotation vertical. Ces derniers ont pour but d'améliorer l'efficacité globale de la transformation de l'énergie éolienne en mécanique et de développer des pales théoriquement capables de tirer le meilleur parti du vent.

Dans tous les cas, quelle que soit la direction et la forme des pales et de leur axe de rotation, les turbines sont supportées par une tour en acier à axe vertical.

La différenciation entre un type d'éolienne et un autre porte sur la manière dont la tour éolienne est maintenue en place, en particulier dans la structure de fondation, comme le montre par exemple la figure 5.

Les installations d'éoliennes offshore sont classiquement divisées en deux types, celui des turbines reliées rigidement au fond, appelées « fixes » ou « posées » (figure 5) et celui des turbines flottantes (figure 8). Le premier type est le plus utilisé et prévoit de poser la turbine directement sur une fondation qui a pour fonction de supporter le poids propre et de résister aux fortes contraintes de flexion (retournement) et de cisaillement. La limite de cette solution est la profondeur du fond marin.

LES ÉOLIENNES OFFSHORE FIXES

Jusqu'à environ 30 m (max 50 m) de hauteur d'eau, il est possible de recourir à une fondation qui relie la tour au sol. Les types de construction utilisés peuvent être catégorisés comme suit :

Monopieu

les monopieux constituent une sorte d'extension de la tour dans le sol (figure 5). Afin de pouvoir transférer dans le sol la charge (de flexion notamment) et de garantir la raideur nécessaire, le diamètre du pieu est habituellement plus grand que celui de la tour d'acier. En 2017, des monopieux d'un diamètre de 8 m ont été installés. ▷

4- Évolution de la taille des turbines éoliennes offshore.

5- Structure d'une éolienne posée offshore.

6- Profondeur d'eau et distance du rivage moyennes des éoliennes posées.

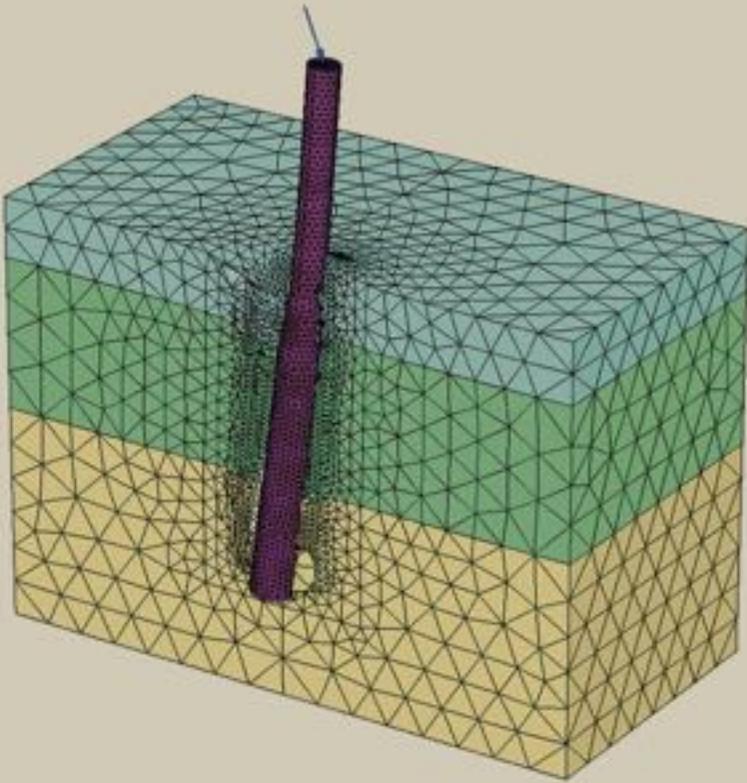
4- Growth in size of offshore wind turbines.

5- Structure of a wind turbine installed offshore.

6- Average water depth and distance from the shore of installed wind turbines.

MODÈLE AUX ÉLÉMENTS FINIS
D'UN MONOPIEUX

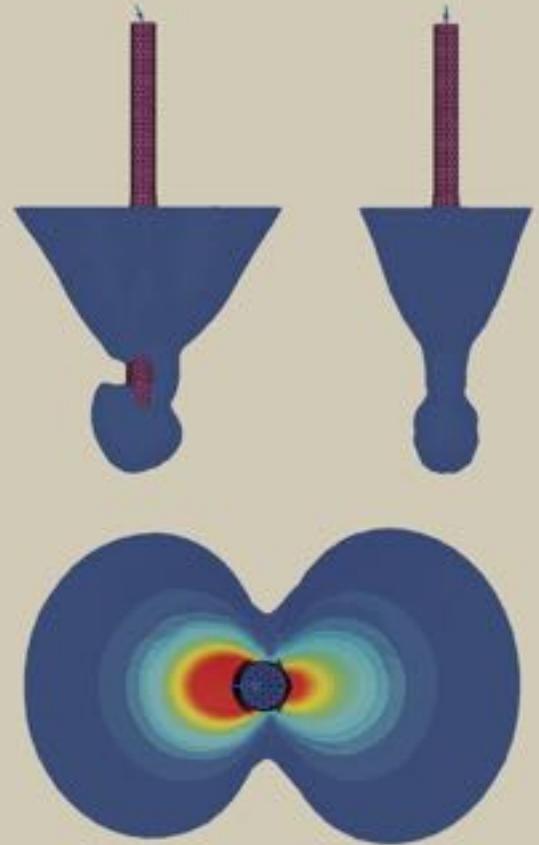
Grille de calcul de déformée



7a

MODÈLE AUX ÉLÉMENTS FINIS
D'UN MONOPIEUX

Champ de déplacement calculé



7b

© CATHIE ASSOCIATES

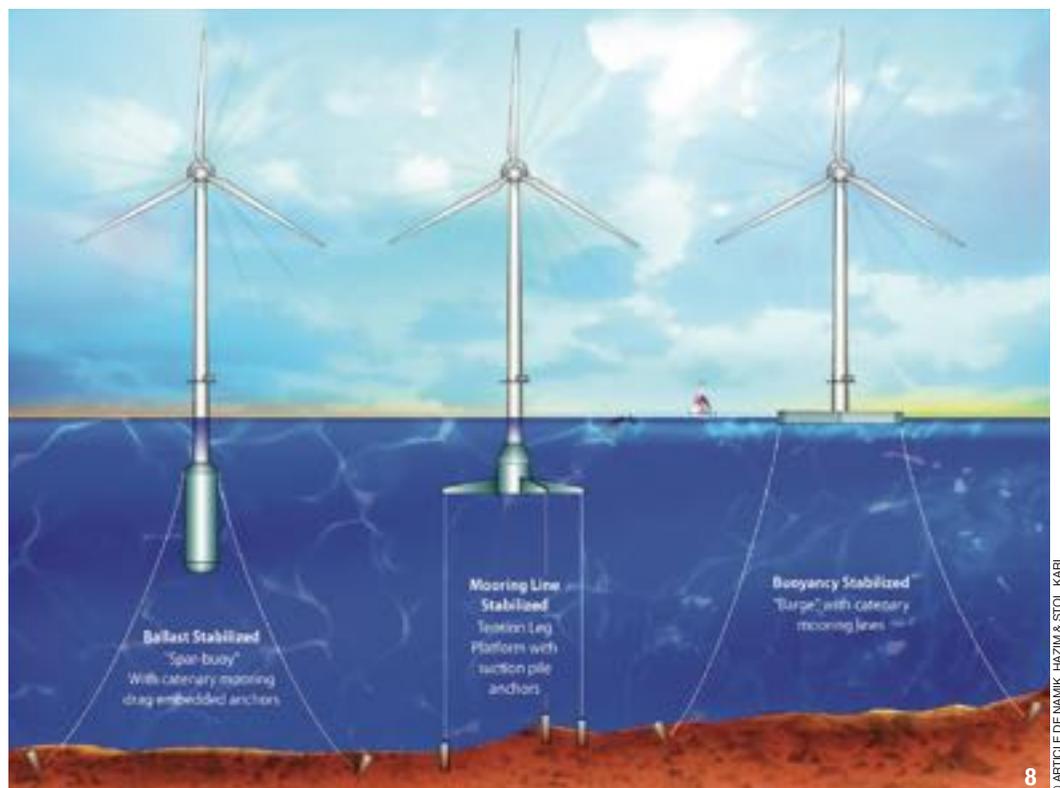
7- Modèle aux éléments finis d'un monopieux (a- grille de calcul de déformée) (b- champ de déplacement calculé).

8- Schéma d'une installation éolienne flottante.

7- Finite element model of a monopile (a- deformation calculation grid) (b- calculated field of displacement).

8- Diagram of a floating wind-power installation.

L'installation se déroule parfois par vibration au début, mais le plus souvent par battage, en utilisant des bateaux spécialement développés pour transporter les monopieux offshore,



8

© ARTICLE DE NAVIK, HAZIM & STOL, KARL



9

© GEOSEA

les soulever et les poser sur le sol. À ce stade, alors que le monopieu est tenu verticalement, le battage intervient au moyen d'un marteau hydraulique (figure 11).

Fondation gravitaire

Dans ce cas, la tour est maintenue stable par le poids de la base elle-même. L'avantage de ce type de structure (appelé GBS) réside dans le fait que la construction peut intervenir à terre et recourir au béton armé, qui

9- Navire avec 4 pieux à bord.

10- Navire en phase de soulèvement vertical d'un pieu.

9- Ship with 4 piles on board.

10- Ship in the phase of pile raising to an upright position.

offre des avantages en termes d'approvisionnement des matériaux de base et de résistance (par exemple à la fatigue). En outre, le GBS est construit creux et transporté par flottaison du chantier de construction au site d'installation, ce qui allège les opérations d'amenée. Une fois en position, la structure est coulée et remplie d'un ballast.

Structure de type *jacket* fixée

La structure de type *jacket* est la plus directement dérivée de la tradition des

installations pétrolières. Elle prévoit que la tour tubulaire soit fixée au sommet d'un treillis en acier - le *jacket* -, lequel est ensuite maintenu au sol par des pieux ou par un GBS sur le fond marin. Une solution de fondation des *jackets* efficace, mais qui pose encore d'importants problèmes de calcul, est celle des caissons à succion (voir encadré : L'ancre à succion). Aujourd'hui le type d'éoliennes à avoir pleinement réalisé un développement industriel complet est celui des éoliennes "posées". Mais les surfaces de zones venteuses exploitables sont encore limitées par les contraintes liées à la profondeur d'eau. La distance à la côte découle directement de ces contraintes. La figure 6 résume bien le contexte décrit.

L'ÉOLIEN OFFSHORE FLOTTANT

Au-delà d'environ 50 m d'eau, les dimensions nécessaires pour supporter la tour deviennent rédhibitoires ; il faut tenir compte du fait que, déjà pour environ 30 m de fond, la contrainte de flexion en tête du pieu est de l'ordre de 300 000 kNm et plus. Dans le cas des ouvrages offshore du pétrolier, des structures de type *jacket* pouvant atteindre 100 à 130 m ont été construites et installées dans le passé. Cependant, l'application de ce type de structure à l'énergie éolienne marine n'est pas économiquement envisageable en raison du facteur d'échelle, qui rend les coûts prohibitifs. ▷



© GEOSEA

10

Dans le cas de fonds de plus de 50 m, l'ingénierie et l'industrie ont trouvé plus adapté de recourir à des structures entièrement flottantes.

Schématiquement, la tour éolienne installée sur une structure flottante doit pouvoir résister aux actions induites par le vent sans se retourner ni osciller ; en plus, elle ne doit pas bouger et donc doit être bien arrimée au sol au moyen d'un système de fondations ancré.

La dynamique du flotteur doit être telle qu'elle permette à l'ensemble de ne pas entrer en résonance avec la tour et les pales en rotation, en compensant la contrainte cyclique provenant des vagues et de la rotation des pales. L'installation des fondations d'ancrage des éoliennes flottantes actuellement en cours de conception a lieu à des profondeurs qui vont approximativement de 100 à 150 m et s'avère une opération technologiquement sophistiquée.

La recherche et l'ingénierie des fondations tentent de fournir des solutions d'ancrage de plus en plus fiables et ce notamment dans les types suivants :

Pieux d'ancrage battus

Ils sont constitués de tubes d'acier à base ouverte, installés par battage avec un marteau sous-marin. L'ancrage a lieu près de la tête du pieu, qui est dans ce cas sollicité en traction et en direction horizontale.

Caissons à succion

Cette solution est utilisée pour l'ancrage des ouvrages offshore pétroliers en haute mer (1 000 m et plus) et est désormais considérée comme fiable ; aujourd'hui, ce type d'ancrage est

utilisé dans les sables et les argiles et s'avère économiquement pratique. D'un point de vue technico-scientifique, la recherche appliquée doit encore résoudre plusieurs problèmes liés à la prédiction des effets dus à :

- La présence simultanée de charges de traction horizontales et verticales ;
- L'action de charges cycliques pouvant atteindre 30 à 50 % de la charge permanente ;
- La prédiction de la variation, le cas échéant, de la résistance du caisson au cours du temps.

Ancres gravitaires

Il s'agit du plus ancien ancrage géotechnique marin.

Le principe de fonctionnement repose sur la friction générée au sol par le poids propre de l'ancre.

L'utilisation est adaptée aux sols sableux ou rocheux.

La construction est normalement réalisée en béton armé, l'ancre étant

11- Battage avec marteau hydraulique.

12- Modèle Éléments Finis d'une ancre à succion.

11- Pile driving by hydraulic hammer.

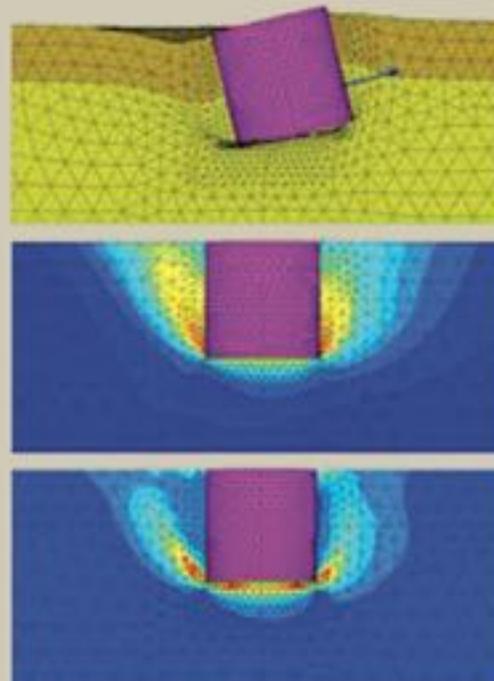
12- Finite element model of a suction anchor.



11

© GEOSSEA

MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS D'UNE ANCRE À SUCCION



12

© CATHIE ASSOCIATES

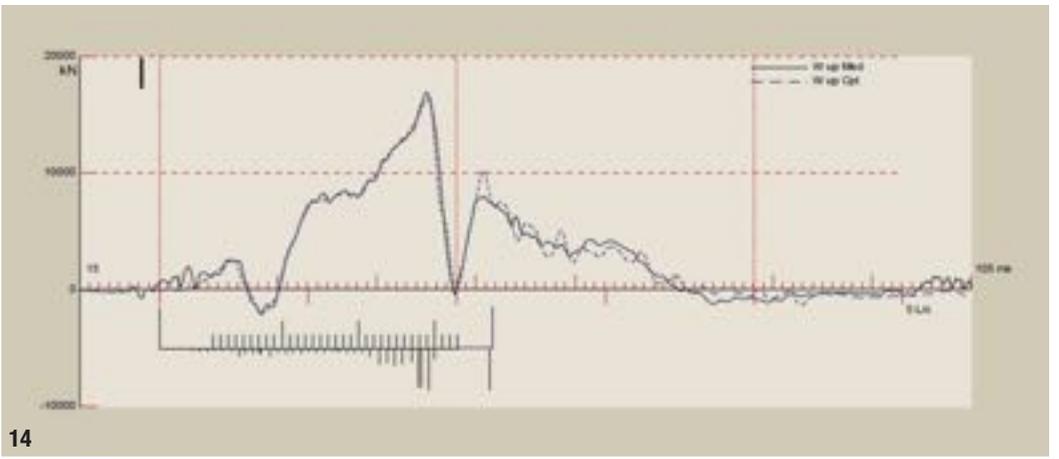
L'ANCRE À SUCCION

L'ancre ou pieu à succion est un type de fondation constitué d'un cylindre en acier de diamètre de 5 m à 10-12 m, fermé au sommet et installé dans le sol par aspiration de l'eau. Le sol opérant à la manière d'un joint, la dépression générée à l'intérieur du cylindre agit sur la structure métallique comme une force verticale. L'enfoncement progressif se poursuit jusqu'à la tête, qui finit par toucher le fond marin (voir le modèle numérique en figure 12).

Le caisson est capable de mobiliser la résistance latérale le long de sa paroi cylindrique et une capacité de base très importante. La combinaison de ces deux facteurs garantit une grande résistance, même dans les sols très mous fréquents en milieu marin.

Le fait que l'eau ne puisse pas facilement pénétrer à l'intérieur par le dessous permet de déclencher un effet de succion lorsque le caisson est sollicité en tension ou par des charges horizontales et donc lorsqu'il est utilisé comme point d'ancrage.

La relative facilité d'installation, même dans les grandes profondeurs, qui nécessite l'utilisation d'une pompe entraînée par un robot, fait de ce type de fondations d'ancrage l'une des plus utilisées. Elle est aujourd'hui proposée comme ancre dans certains projets en cours de parcs éoliens flottants.



LE TESTS DYNAMIQUES SUR PIEUX OFFSHORE - UNE SPÉCIALITÉ FRANÇAISE

Comme toutes les fondations, les pieux offshore, en particulier, doivent être soumis à des essais de chargement qui prouvent leur bonne conception.

Il faut d'abord rappeler que les pieux utilisés pour les jackets ont environ 2 m de diamètre, tandis que les monopieux peuvent atteindre 8 m et plus. En mer, tout est toujours plus complexe et coûteux, et l'on peut donc imaginer comment la seule construction du système d'ancrage représente en soi une opération délicate. Les essais statiques en mer sont par conséquent limités à des cas isolés, que des méthodes de conception affinées rendent économiquement intéressants.

Les tests statiques ne peuvent donc être utilisés pour contrôler systématiquement les pieux offshore. À cette fin, depuis les années 1980, la technologie a développé des tests de chargement dynamiques. Ces tests sont économiquement viables pour les pieux en acier battus, puisqu'ils exploitent la phase d'installation elle-même pour déterminer la résistance du pieu. Le principe en est simple : pour enfoncer le pieu, le marteau doit vaincre la résistance du fût et de la base.

Le principe des tests dynamiques consiste à enregistrer durant quelques dizaines de millisecondes, en tête du pieu, l'onde de contrainte imprimée par la masse battante et à poursuivre l'acquisition après l'impact ; puis à enregistrer la série d'ondes que le sol renvoie dans le pieu et qui reviennent à la surface en quelques dizaines de millisecondes. Les outils utilisés sont des jauges de contrainte pour la mesure locale de la déformation axiale et des accéléromètres pour la mesure de l'accélération (figure 13). Compte tenu de la vitesse de propagation des ondes

élastiques dans l'acier (environ 5 km/sec), il est nécessaire, pour disposer de signaux enregistrés de bonne qualité, que le système d'acquisition présente des fréquences d'échantillonnage d'environ 50-100 kHz. Les enregistrements sont interprétés au moyen d'une technique d'inversion qui consiste à reproduire au mieux le signal de retour enregistré à partir du signal d'entrée en tête et à comparer le résultat ainsi obtenu avec le signal réel. Le signal synthétique est produit par un modèle numérique dynamique du pieu et du sol ; le calcul est répété en faisant varier la distribution de la résistance le long du pieu et à sa base jusqu'à ce que l'erreur soit inférieure à un seuil donné. Un résultat typique de ce type d'analyse est illustré dans figure 14. Cette procédure est dite « de calage ».

La méthodologie de test dynamique, comparée aux tests statiques sur des pieux identiques et sur le même terrain, a démontré et démontre encore sa fiabilité. La méthode est à ce jour encore inégalée.

G-Octopus, société française basée à Nanterre et appartenant au groupe Cathie Associates, est reconnue comme un acteur leader des tests dynamiques de pieux offshore. La qualité des signaux doit être précise pour fournir des résultats fiables et corrects. À cette fin, G-Octopus a développé une série de procédures techniques pour assurer le meilleur résultat recherché.

Récemment, G-Octopus a entamé une nouvelle phase de recherche afin d'améliorer sa technologie et de développer des outils récupérables ne nécessitant pas de fixation par perçage et boulonnage (ces méthodes d'installation étant de moins en moins acceptées par l'industrie offshore).

ensuite transportée par flottage, coulée sur place et finalement lestée par du ballast.

Ancres marines

Ce sont les ancres navales classiques, spécialement développées par les fabricants pour fournir une capacité d'ancrage adaptée.

L'inconvénient pour le secteur éolien procède de son coût, de l'absence de méthode de calcul fiable de prédiction de la résistance, de la nécessité de pré-charger l'ancre.

13- Accéléromètres pour un test dynamique.

14- Résultat d'un calage pour un test dynamique offshore.

13- Accelerometers for a dynamic test.

14- Calibration result for an offshore dynamic test.

L'INSTALLATION DES MONOPIEUX.

Une fois construits, les pieux de fondation doivent être installés.

Ils sont généralement posés au rythme de 4 à 6 par rotation au moyen des bateaux spécialement conçus pour le transport, le levage et le battage des pieux (figures 9 et 10). Ceux-ci peuvent mesurer jusqu'à 8 m de diamètre et doivent être enfoncés sur plusieurs dizaines de mètres dans le fond marin. Afin d'opérer en toute sécurité au

cours des manœuvres d'installation et de battage, le navire est équipé de quatre pieds verticaux composés de pylônes en acier, qui sont fichés dans le sol et qui lui permettent de s'élever complètement au-dessus du niveau de la mer afin de ne pas être affecté par le mouvement des vagues.

Après l'installation des monopieux, un second bateau revient sur le site et installe d'abord la tour puis complète finalement la structure avec le rotor et les pales associées (figure 1). □

ABSTRACT

OFFSHORE WIND TURBINES - FOUNDATION DEVELOPMENT AND ISSUES

EMILIO NICOLINI, CATHIE ASSOCIATES S.A.R.L.

In the renewable energy sector, the development of offshore wind-power farms has gathered pace in the past decade. The wind-power industry in Europe is by far the most highly developed in the world, both for the number of turbines installed and the cumulative capacity (15.8 GW at end-2017). Improvements made to the turbines, the structures and the foundations have contributed to the rapid growth in installed capacity. Cathie Associates, an engineering office specialised in geotechnics, has cutting-edge expertise in the sector of offshore foundations for energy. G-Octopus, a French subsidiary of the Cathie group, is a recognised specialist in dynamic testing of offshore and onshore piles. □

LAS TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE - DESARROLLO Y ESPECIFICIDADES DE LOS CIMIENTOS

EMILIO NICOLINI, CATHIE ASSOCIATES S.A.R.L.

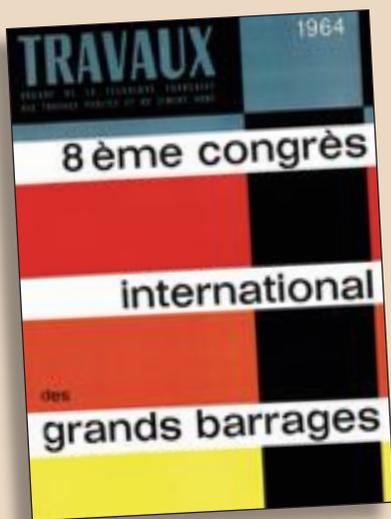
En el sector de las energías renovables, el desarrollo de los campos eólicos offshore se ha acelerado durante la última década. El sector eólico europeo está lejos de ser el más desarrollado del mundo, tanto en número de turbinas instaladas como de potencia acumulada (15,8 GW a finales de 2017). Las mejoras aportadas a las turbinas, las estructuras y los cimientos han contribuido al auge de la potencia instalada. Cathie Associates, gabinete de estudios especializado en geotécnica, es uno de los principales expertos en el sector de los cimientos offshore para la energía. G-Octopus, filial francesa del grupo Cathie, es un reconocido especialista en pruebas dinámicas de pilotes offshore y onshore. □

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : AMÉNAGEMENT DE LA BIA EN CÔTE D'IVOIRE ÉQUIPEMENT DE LA CHUTE D'AYAMÉ II

PAR J. VASSIVIÈRE, INGÉNIEUR, INSPECTION GÉNÉRALE HORS MÉTROPOLE, EDF

TRAVAUX HORS SÉRIE - AVRIL 1964 - 8^e CONGRÈS DES GRANDS BARRAGES

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR MICHEL MORGENTHALER



D'abord protectorat français en 1843, devenu colonie française le 10 mars 1893, le pays acquiert son indépendance le 7 août 1960, proclamée par Félix Houphouët-Boigny, premier président de la République de Côte d'Ivoire, celui que son peuple surnommait plus tard « le Vieux ». À cette époque, au début des années 60, la Côte d'Ivoire connaît une expansion remarquable avec un taux de croissance de 30%. Les besoins en eau et en électricité sont en rapport.

L'équipement de la chute d'Ayamé II est le deuxième et dernier de l'aménagement de la rivière Bia qui se jette dans le golfe de Guinée. C'est un barrage à voûtes multiples et contreforts, de 35 m de haut, avec une usine de 30 000 kW à son pied comportant deux groupes à turbine Kaplan à axe vertical travaillant sous 30 m de chute.

Le volume de la retenue est de 1,1 milliards de m³. L'apport annuel moyen est de 2,5 milliards de m³.

Sur cet ouvrage, qui sera mis en service en 1965, complétant un

aménagement dont les études et la réalisation avaient commencé bien avant l'indépendance, on ne s'étonnera pas de trouver des acteurs tels que Électricité de France en qualité d'ingénieur conseil, le bureau d'études Séchaud, les entreprises de génie civil Dumez et Borie, les équipementiers Neyrpic, Ateliers des Forges de la Loire, Société Générale d'Entreprise, pour ne citer que les plus connus.

C'était la fin de la haute époque des grands travaux dans ce qui avait été l'empire colonial français.

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: DEVELOPMENT OF THE BIA IN IVORY COAST - EQUIPMENT OF THE AYAME II WATERFALL

TRAVAUX SPECIAL ISSUE - APRIL 1964

J. VASSIVIÈRE

The Ivory Coast was first a French protectorate in 1843, and then became a French colony on 10 March 1893. The country acquired its independence on 7 August 1960, proclaimed by Félix Houphouët-Boigny, first president of the Ivory Coast Republic, whom his people would later call "the Old Man". At that time, in the early 1960s, the Ivory Coast experienced remarkable growth, with a 30% growth rate. Water and electricity needs grew in similar fashion. Equipment of the Ayamé II waterfall was the second and last stage in development of the Bia River which flows into the Gulf of Guinea. It is a buttressed multiple-arch dam, 35 metres high, with a 30,000 kW plant at its base containing two vertical-axis Kaplan turbine sets working under a 30-metre waterfall. The volume of the reservoir is 1.1 billion m³. The average annual inflow is 2.5 billion m³. On this structure, which would be commissioned in 1965, completing a development scheme for which the design engineering and works had begun well before independence, it is not surprising to find stakeholders such as Electricité de France as consulting engineer, the Séchaud engineering office, the civil engineering contractors Dumez and Borie, and the equipment suppliers Neyrpic, Ateliers des Forges de la Loire and Société Générale d'Entreprise, to mention only the best known. This was the end of the golden age of major works in what had been the French colonial empire. □

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: ORDENACIÓN DEL RÍO BIA EN COSTA DE MARFIL - CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE AYAME II

TRAVAUX HORS SÉRIE - ABRIL DE 1964

J. VASSIVIÈRE

Inicialmente protectorado francés desde 1843, Costa de Marfil se convirtió en colonia francesa el 10 de marzo de 1893 hasta su independencia, proclamada el 7 de agosto de 1960 por Félix Houphouët-Boigny, primer presidente de la República marfileña, más tarde apodado por el pueblo como "el Viejo". En aquella época, a comienzos de los años 60, Costa de Marfil experimentaba una notable expansión, con una tasa de crecimiento del 30% y el consiguiente incremento de sus necesidades de agua y electricidad. Ayamé II es la segunda y última presa construida en el marco de la ordenación del río Bia, que desemboca en el golfo de Guinea. Se trata de una presa de múltiples bóvedas y contrafuertes, de 35 m de altura, con una central de 30.000 kW a su pie, formada por dos grupos con turbina Kaplan de eje vertical que trabajan bajo 30 m de caída. El volumen del embalse es de 1.100 millones de m³. El aporte anual medio es de 2.500 millones de m³. No sorprende que en esta construcción, que entró en servicio en 1965, completando una ordenación cuyos estudios y realización comenzaron mucho antes de la independencia, participaran empresas como Electricité de France, en calidad de ingeniero asesor, el gabinete de estudios Séchaud, las empresas de ingeniería civil Dumez y Borie, y los fabricantes de equipos Neyrpic, Ateliers des Forges de la Loire o Société Générale d'Entreprise, por citar a algunos de los más conocidos. Esta obra marca el final de la época dorada de las grandes obras de lo que un día fue el imperio colonial francés. □

Aménagement de la Bia

Equipement de la chute d'Ayamé II

(Novembre 1963.)

par J. VASSIVIERE

*Ingénieur à Electricité de France,
Inspection générale pour la Coopération hors Métropole.*

Préambule.

REFLET d'une expansion économique remarquable, l'accroissement des besoins énergétiques de la Côte-d'Ivoire se traduit par une consommation d'électricité dont le taux actuel de progression est de 30 p. 100.

Pour répondre à un tel développement, des moyens de production thermiques et hydrauliques combinés sont progressivement mis en place.

Actuellement, la réalisation de l'équipement de la chute d'Ayamé II, deuxième et dernière étape de l'aménagement de la rivière Bia, suit son cours. Il consiste en l'édification d'un barrage de 35 m de hauteur et d'une usine située à son pied. A sa mise en service, dans les premiers mois de 1965, sa puissance installée de 30 000 kW viendra s'ajouter à celle disponible de 20 000 kW à Ayamé I ; elle pourra alors fournir, en année hydrologique moyenne, 150 millions de kWh, portant à 250 millions de kWh la capacité de production du complexe hydroélectrique Ayamé I et II.

La Bia et le complexe hydroélectrique.

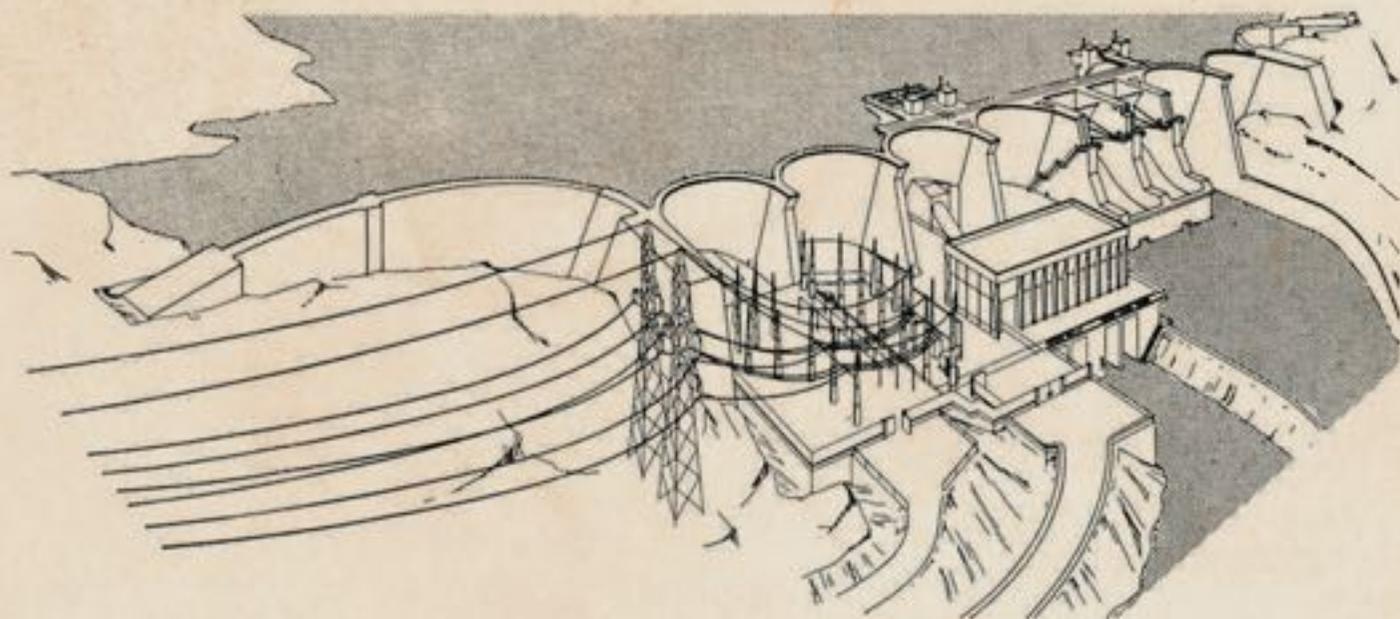
Petit fleuve côtier du golfe de Guinée, la Bia parcourt environ 250 km depuis sa source jusqu'au site choisi pour édifier le barrage d'Ayamé I.

Ce dernier est situé à quelque 140 km au nord-est d'Abidjan, à proximité de la frontière Ivoirio-Ghanéenne.

La configuration générale de la vallée est caractérisée par :

- un relief relativement mou, difficile à observer sous une végétation tropicale exubérante ;
- des formations superficielles latéritiques de grande épaisseur dessinant le relief ;
- l'existence, sous cette couverture, d'un magma éruptif (batholite) dont la topographie suit irrégulièrement et d'assez loin celle de surface. La transition entre les formations de surface et la roche mère est marquée par une altération plus ou moins avancée de celle-ci (latérisation). La propagation de ce phénomène est visible le long des diaclases par lesquelles pénètre l'eau météorique ;

Fig. 1. — Perspective générale de l'aménagement.



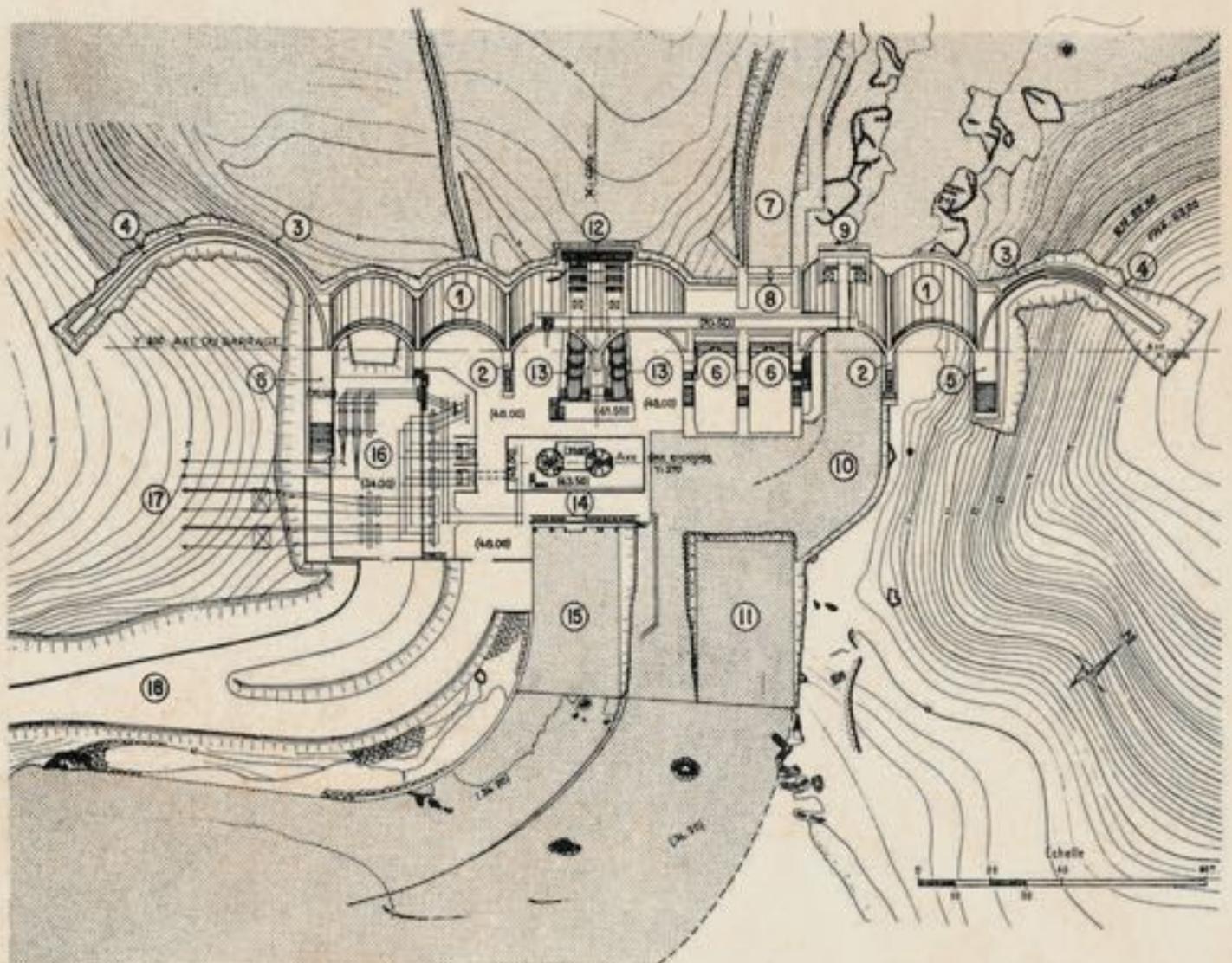


Fig. 2. — Vue en plan générale de l'aménagement.

- | | |
|--|---|
| <p>(1) Voûte courante.
 (2) Contrefort courant.
 (3) Voûtes de raccordement rive droite et rive gauche.
 (4) Culées rive droite et rive gauche en fouilles blindées.
 (5) Contreforts d'appui des voûtes courantes et des voûtes de raccordement.
 (6) Evacuateur de crues. Capacité de débit : $2 \times 600 \text{ m}^3/\text{s}$.
 (7) Canal de dérivation provisoire de 2^e phase.
 (8) Piles pour batardage pour la fermeture de l'ouvrage.
 (9) Vidanges de fond. Capacité de débit : $2 \times 150 \text{ m}^3/\text{s}$.</p> | <p>(10) Canal de restitution des vidanges.
 (11) Fosse de réception du débit de crue.
 (12) Prises d'eau. Capacité de débit : $2 \times 57 \text{ m}^3/\text{s}$.
 (13) Conduites forcées : $\varnothing = 4,50 - L = 45 \text{ m}$.
 (14) Centrale hydroélectrique : 2 groupes de $16\,300 \text{ kW}$.
 (15) Canal de fuite.
 (16) Poste haute tension.
 (17) Départs.
 (18) Routes d'accès.</p> |
|--|---|

— une pente générale uniforme et faible du lit de la rivière, cassée seulement par l'accident des chutes d'Ayamé, où, sur près de 4 km, la Bia perd 30 m de hauteur.

Le régime hydrologique, dit « équatorial de transition », est caractérisé par :

- une période de basses eaux de décembre à mai avec un étiage sévère en janvier inférieur à $4 \text{ m}^3/\text{s}$;
- une période de hautes eaux de juin à fin juillet d'un débit moyen d'environ $200 \text{ m}^3/\text{s}$;
- un petit étiage d'août (débit : $40 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- une seconde période de hautes eaux de septembre à novembre (débit moyen : $100 \text{ à } 125 \text{ m}^3/\text{s}$).

Encore faut-il compléter ces grandes lignes en mentionnant :

- une période exceptionnellement sèche des mois d'août 1958 à mai 1959 ;
- une crue particulièrement volumineuse du 15 juillet au

15 août 1963 avec une pointe exceptionnelle évaluée de 1800 à 2000 m^3/s le 4 août pendant une période réputée habituellement sèche.

A cette date la crue maximale connue avait à peine dépassé 700 m^3/s et datait de juillet 1958 survenant au cours de la construction du premier barrage ; elle n'avait pas causé de dégâts.

Pour compenser la sévérité de l'étiage, il était nécessaire de créer une réserve importante. Il a suffi de relever le plan d'eau à Ayamé I de 22 m seulement pour accumuler dans la vallée près de 1,1 milliard de m^3 .

Cette importante réserve commande l'exploitation d'Ayamé I et ultérieurement en série celle d'Ayamé II.

Elle permet de régulariser 80 p. 100 des apports dont le total annuel est de 2,5 milliards de m^3 en moyenne.

Le bassin versant intermédiaire entre les deux aménagements est petit, de sorte que les caractéristiques hydro-

logiques sont pratiquement les mêmes pour les deux aménagements :

Bassin versant	9 320 km ²
Module	80 m ³ /s
Etiage	3,3 m ³ /s
Crue maximale connue	1 800 à 2 000 m ³ /s
Apports annuels moyens	2,5 milliards de m ³
Volume de la retenue	1,1 milliard de m ³
Tranche utile	800 millions de m ³

et les caractéristiques d'équipement comparées sont les suivantes :

	Ayamé I	Ayamé II	
Débits	114	114	
Hauteurs de chute	19	30	
Puissances installées	20 000	30 000	
Producti- bilité	maximale	110	165
	moyenne	100	150
	minimale	80	120

Le site d'Ayamé II.

Le site d'Ayamé II présente des analogies certaines avec celui d'Ayamé I :

- les formes topographiques sont assez voisines ;
- la structure géologique reste toujours la même.

Formes topographiques.

Avant les travaux, le lit était barré par un seuil dioritique dominant, à l'amont et à l'aval, des biefs qu'un sillon creusé dans sa masse faisait communiquer.

Le versant rive gauche est abrupt (35 à 40° en moyenne). Celui de rive droite est en pente beaucoup plus douce (10° en moyenne).

Entre les deux versants, au niveau fixé pour la crête du barrage, la largeur de la vallée est de 312 m.

A environ 40 m à l'amont de l'axe du barrage, la vallée s'élargit, sur le versant rive droite, de telle sorte que celui-ci forme un éperon tout indiqué pour servir d'appui. Au pied de cet éperon coule un petit marigot (ruisseau) d'abord (S.-W.-N.-E.) transversal à l'axe de la vallée principale, puis venant se jeter obliquement (E.-W.) dans la Bia.

Entre la Bia et ce marigot vient mourir, en pente très douce, un mamelon dont le relief est plus accentué à l'amont.

A l'aval immédiat du site, après s'être étalée dans une large crique, la rivière change de direction pour couler en direction S.-W. et, sur une distance d'environ 500 m, abaisse son plan d'eau de 4 m.

Structure géologique.

Appui rive gauche.

Les formations superficielles latéritiques : terres, argiles latéritiques, argiles sableuses, latérites consolidées, renferment des blocs de diorite de plus en plus nombreux et de plus en plus gros vers la base à l'approche de la roche mère. Elles augmentent d'épaisseur du fond de la vallée vers le sommet du versant : nulles dans le lit de la rivière où elles sont remplacées par une faible épaisseur d'alluvions (sables et galets), elles atteignent 12 m au niveau de la crête du barrage.

Sous ces formations, la topographie du rocher constitué de diorites, gabbro-diorites et micro-diorites reproduit en l'atténuant beaucoup la topographie de surface.



(Photo J. Carval, Abidjan.)

Le site d'Ayamé II. Les chutes et l'appui rive gauche (12 janvier 1962).

Appui rive droite.

Les formations superficielles qui atteignent 13 m au niveau de la crête du barrage diminuent assez régulièrement d'épaisseur et viennent se terminer au bord du marigot. Entre celui-ci et la Bia, il n'y a pas de latérite mais seulement une faible épaisseur d'alluvions (sables et galets) du moins sous les emprises du barrage, car il est très probable qu'à l'amont, on retrouve des formations latéritiques sur le mamelon.

Sous ces formations, on trouve souvent la zone d'altération du rocher en cours de latérisation.

Le rocher sain ne monte que très doucement et on le trouve à 17 m de profondeur sous la calée rive droite.

Des formations latéritiques superficielles, on retiendra :

- qu'elles présentent une résistance de structure certaine, les talus qu'on y taille tiennent bien avec des pentes élevées ;
- qu'il est facile d'y descendre des fouilles blindées.

Conception d'ensemble et description des ouvrages.

Après comparaisons économique et technique entre différentes possibilités d'équipement la solution retenue consiste à utiliser les 30 m de chute naturelle :

- d'une part en relevant le plan d'eau de 26 m en édifiant un barrage à l'emplacement choisi ;
- d'autre part, en abaissant de 4 m le plan d'eau aval par déroctage du lit de la rivière sur les 600 derniers mètres des chutes économiquement utilisables.

L'usine est disposée au pied du barrage côté rive droite où aboutit la route d'accès.

Caractéristiques générales.

Le plan d'eau sera tendu à la cote de retenue normale.	(68,50)
Les plus hautes eaux s'élèveront à la cote	(69,00)
Le volume de la retenue sera de	8,25 × 10 ⁶ m ³
L'évacuateur de crue pourra déverser	1 270 m ³ /s
Les vidanges pourront évacuer jusqu'à	300 m ³ /s
Le débit maximal de restitution pourrait être de	1 630 m ³ /s

Les niveaux aval correspondant aux débits respectifs ci-après seront :

Débit de 114 m ³ /s (2 groupes en service)	38,50
Débit de 1 630 m ³ /s (maximal évacué)	46,00

Le barrage et l'évacuateur de crues.

Le barrage adopté pour Ayamé II est un ouvrage en béton du type à voûtes multiples, avec évacuateur de crue en saut de ski incorporé et ouvrages de raccordements aux berges descendus en fouilles blindées.

De 35,50 m de hauteur maximale, il ferme la vallée jusqu'à la cote (70,50) sur une longueur de 312 m. Six voûtes, dont quatre en rive droite, deux en rive gauche, sont de définition géométrique identique. Inclonnées vers l'amont avec un fruit de 0,6, elles s'appuient sur des contreforts de 2 m de largeur

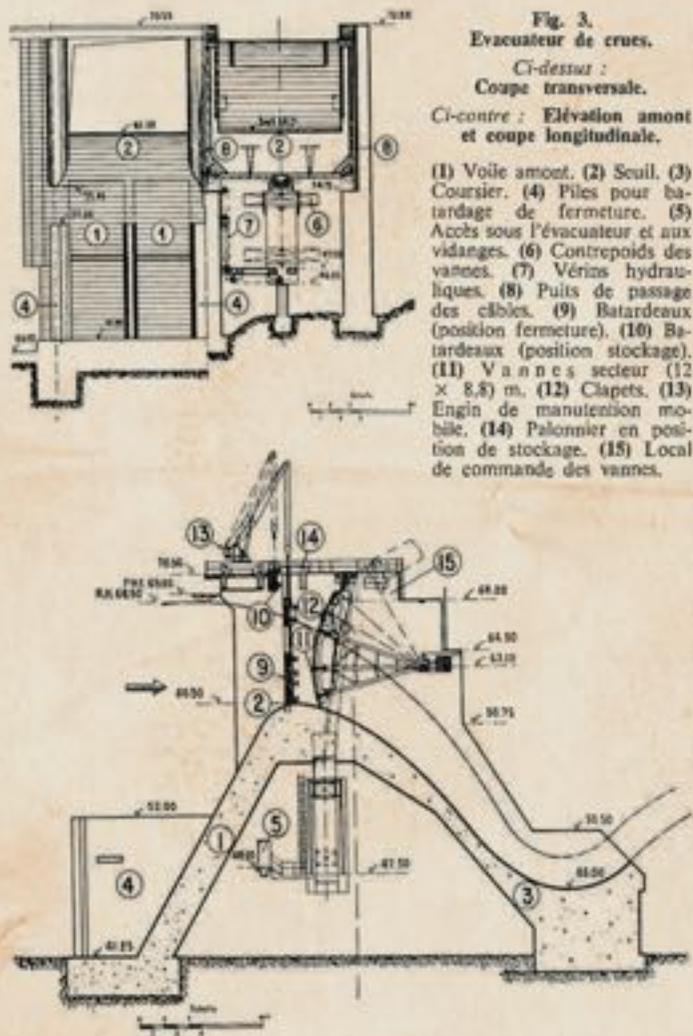


Fig. 3.
Evacuateur de crues.
Ci-dessus :
Coupe transversale.
Ci-contre : Elevation amont
et coupe longitudinale.

(1) Voile amont. (2) Seuil. (3) Coursier. (4) Piles pour batardeau de fermeture. (5) Accots sous l'évacuateur et aux vidanges. (6) Contrepoids des vannes. (7) Vérins hydrauliques. (8) Puits de passage des câbles. (9) Batardeau (position fermeture). (10) Batardeau (position stockage). (11) Vannes secteur (12 x 8,8 m). (12) Clapets. (13) Engin de manutention mobile. (14) Palonnier en position de stockage. (15) Local de commande des vannes.

espacés de 25 m. Elles encadrent l'évacuateur de crues implanté au milieu du lit. L'ossature de ce dernier, en béton armé évidé, est composée de 3 contreforts, de deux voiles amont fermant la retenue jusqu'au niveau (60,50), de deux seuils et coursiers de 12 m de largeur chacun formant doucine pour la restitution, en saut de ski, des débits de crues.

Les pertuis sont fermés entre les cotes (60,50) et (68,50) par deux vannes secteur aux dimensions 12 x 8, équipées de clapet dans leur partie supérieure.

La manœuvre des vannes, équilibrées par des contrepoids, est assurée par des vérins hydrauliques. Les contrepoids en béton armé sont disposés dans les évidements du barrage. Les vannes, contrepoids et vérins sont reliés par des câbles de 50 mm de diamètre. Les commandes se font à partir d'une chambre de manœuvre ménagée dans la partie supérieure du contrefort médian de l'ouvrage.

Pour raccorder le barrage avec les versants rive droite et

rive gauche et pénétrer dans la couverture latéritique, il a fallu renoncer aux voûtes courantes en raison de leur inclinaison. On a adopté des voûtes verticales aux rayons respectifs de 32 et 22 m et de 1 m d'épaisseur.

Le passage des voûtes courantes aux voûtes verticales se fait sur des contreforts spéciaux de 6 m de largeur. Enfin des culées de 3 m de largeur, descendues au rocher sain en fouilles blindées béton, complètent les fermetures de rive, épaulent les voûtes adjacentes et forment écran d'étanchéité.

Avant de décrire les ouvrages annexes, nous nous proposons d'exposer les raisons du choix du type de barrage par comparaison avec celui d'Ayamé I.

La ressemblance des sites incitait a priori à reprendre, en les adaptant, les dispositions du barrage amont.

Ce dernier, décrit dans les numéros 286 et 319, d'août 1958 et mai 1961, est constitué par la juxtaposition de plots monolithiques autostables. Chacun de ces plots consiste en un contrefort de 2 m de largeur, s'épanouissant à l'amont suivant une tête arrondie de 10 m de largeur formant écran d'étanchéité.

Sa construction s'est révélée, dans l'ensemble facile.

Les ouvrages annexes s'incorporent bien.

L'autostabilité des plots :

- est une assurance en cours de chantier contre les dangers de submersion ;

- n'impose pas un ordre de construction préétabli.

Or, la réserve amont constitue pour le chantier d'Ayamé II une protection qui s'est révélée d'une grande efficacité lors de la crue de juillet-août 1963. La solution voûtes multiples, incertaine dans le cas d'Ayamé I, reprenait tout son intérêt et la comparaison économique en justifiait alors le choix.

Si les ouvrages annexes (prises d'eau, évacuateur, vidanges de fond) lui font perdre en partie l'élégance classique des ouvrages à voûtes multiples, on doit cependant porter à l'actif de cette solution la netteté des ouvrages de raccordement avec les berges.

Vidanges de fond.

Deux vidanges de fond sont équipées au pied de la voûte attenante à l'évacuateur de crue en rive gauche de ce dernier.

Elles sont dimensionnées pour permettre en exploitation de dénoyer le seuil des prises d'eau sans interrompre la marche industrielle d'Ayamé I.

En fin de chantier, elles dériveront la rivière pendant que seront exécutés les travaux de fermeture du barrage.

Leur utilisation est également prévue pendant les travaux de déroctages du lit ainsi qu'il sera vu plus loin.

Elles comportent chacune de l'amont vers l'aval :

- des grilles en barreaux de béton armé ;
- des rainures pour batardeau complémentaire éventuel ;
- une vanne amont du type wagon, aux dimensions 2,75 x 3,60 m ;
- une galerie blindée de 7 m de longueur ;
- une vanne secteur aux dimensions 2,90 x 2,90 m.

Elles débouchent dans un canal dont le mur bajoyer côté rivière est constitué par le batardeau de dérivation provisoire.

Côté rive gauche, les formes à donner à la berge ont été examinées sur modèle réduit : les vidanges répétées qui seront faites pour exécuter les déroctages aval constitueront autant d'expériences « en vraie grandeur » qui permettront de préciser les dispositions à retenir, compte tenu de la qualité du rocher qui sera mis à jour.

Les vidanges sont identiques, symétriques et indépendantes l'une de l'autre.

Les vannes-wagon sont classiques. Elles sont manœuvrées par brimballes avec commandes installées sur une plate-forme

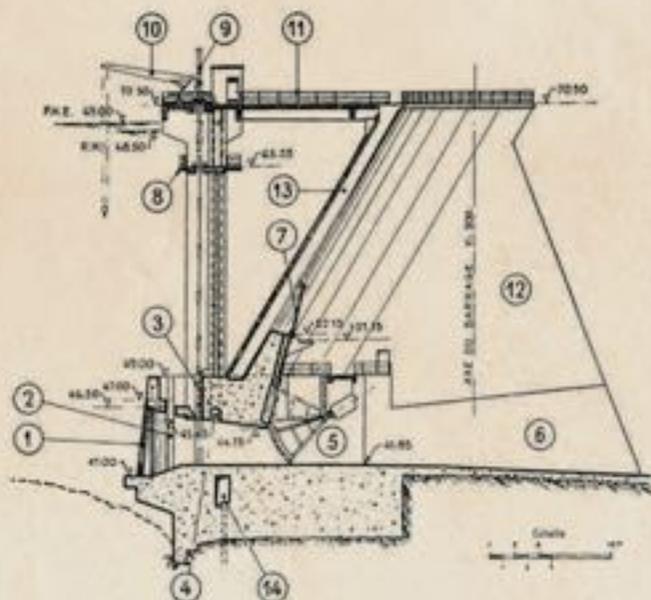


Fig. 4. — Vidange de fond. Coupe transversale.

- | | |
|---|--|
| (1) Grilles en béton armé. | (8) Plate-forme de visite et d'entretien. |
| (2) Rainures pour batardeau de secours. | (9) Commande des vannes-wagon. |
| (3) Vannes-wagon (2,75 x 3,60 m). | (10) Engin de manutention. |
| (4) Reniflard. | (11) Pont d'accès à la plate-forme des vidanges. |
| (5) Vannes secteur (2,90 x 2,90 m). | (12) Contrefort n° 8 du barrage. |
| (6) Canal de restitution. | (13) Voûte n° 8. |
| (7) Commande des vannes secteur. | (14) Galerie de drainage. |

au niveau du sommet du barrage. Une plate-forme intermédiaire permet la visite et l'entretien au niveau (65,55). Les guidages sont disposés sur des piliers en béton armé supportant les plates-formes. L'accès à ces dernières se fait sur un pont jeté entre la voûte et les piliers.

Les vannes de réglage sont du type secteur avec bordé en tôle d'acier inoxydable. Dans le cas considéré, ce type de vannes est apparu comme léger et économique, en même temps qu'intéressant par sa sûreté de fonctionnement en écoulement noyé.

La manœuvre se fait par un servo-moteur dont la tige du piston porte une crosse reliée à la vanne par l'intermédiaire d'une bielle. Ces organes et le poste de commande sont

disposés au-dessus d'une plate-forme dominant les pertuis. L'accès se fait depuis l'usine à travers l'évacuateur de crue.

Prises d'eau. Contrefort 4. Conduites forcées. Usine.

(Voir fig. 5.)

Pour la sécurité de l'exploitation, la totalité de l'équipement de production a été scindée en deux unités indépendantes.

Les prises d'eau sont disposées à la base de deux tours sur une infrastructure liée au contrefort 4. Les circuits hydrauliques se répartissent symétriquement de part et d'autre de ce dernier.

Les deux groupes de production sont installés dans un bâtiment d'usine à l'aval immédiat du barrage.

Ces dispositions font que l'assise du contrefort C4 se trouve limitée latéralement par les tranchées des conduites forcées, en même temps que longitudinalement par la fouille profonde de l'usine.

Dans ces conditions, la stabilité de ce contrefort se présente différemment de celle des contreforts voisins et mobilise avant tout l'importante infrastructure des prises d'eau.

Un drainage de cette infrastructure permet d'écartier les pressions et de prendre en compte la masse considérée, qui assure l'équilibre de l'ensemble.

De surcroît, à l'aval, la queue du contrefort prend appui sur un massif élargi qui bloque les coudes des conduites et pourrait éventuellement répartir des efforts sur l'infrastructure de l'usine.

En dessous du niveau (48,00), le contrefort s'épaissit de 2 à 4 m.

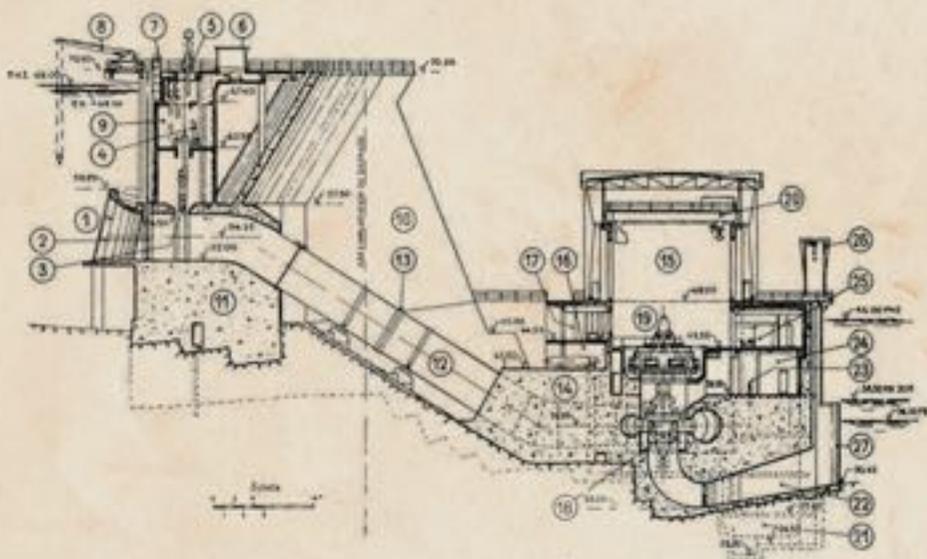
Chacune des prises d'eau comporte :

- des grilles métalliques de 60 m² de surface ;
- un entonnement pour la mise en vitesse progressive ;
- un tronçon de conduit rectangulaire dimensionné pour recevoir les organes d'obturation :
 - batardeau de 4 x 4,50 m à l'amont ;
 - vanne-wagon de 4 x 4,50 m à l'aval ;
- un tronçon carré-rond, formant ancrage amont de la conduite forcée accrochée au cadre de la vanne.

Il n'existe qu'un batardeau pouvant être utilisé indifféremment sur l'une ou l'autre prise. Il est mis en place à l'aide d'un engin de manutention. Les vannes sont manœuvrées chacune par un vérin hydraulique (40 t) doublé pour le déblocage d'un second vérin surpuissant (60 t).

Fig. 5. — Prises d'eau, barrage, conduites forcées, usine, coupe transversale.

- | | |
|---|--|
| (1) Grilles métalliques de prises d'eau (2 x 60 m ²). | (12) Conduite forcée Ø : 4,50 L = 45 m. |
| (2) Rainures pour batardeau. | (13) Joint de dilatation. |
| (3) Vannes de prise d'eau (4 x 4,50 m). | (14) Massif aval. |
| (4) Vérin de décollage. | (15) Usine. |
| (5) Vérin principal. | (16) Echangeurs. |
| (6) Local de commande. | (17) Bureaux. |
| (7) Batardeau en position de stockage. | (18) Turbines « Kaplan » (vitesse de rotation : 214 tr/min). |
| (8) Engin de manutention mobile. | (19) Alternateurs (P = 19 000 kVA). |
| (9) Chambre de visite et d'entretien des vannes. | (20) Pont roulant (75 t). |
| (10) Contrefort n° 4 du barrage. | (21) Puits. |
| (11) Infrastructure des prises d'eau et galerie de drainage. | (22) Aspirateurs. |
| | (23) Pompes. |
| | (24) Auxiliaires. |
| | (25) Salle de commande. |
| | (26) Manutention des batardeaux des aspirateurs. |
| | (27) Piles pour batardeaux complémentaires de secours. |



Au-dessus des pertuis on observe les guidages du batardeau à l'amont, les tours visitables des vannes à l'aval, avec :

- au niveau (62,95), le plancher de visite et le vérin de décollage ;
- au niveau (67,40), le stockage du batardeau, des brimballes ;
- au niveau (69,40), le groupe et le local de commande ;
- au niveau (70,50), le vérin principal et la plate-forme de circulation.

La crête du barrage est desservie par un pont allant des prises d'eau aux vidanges de fond passant au-dessus de l'évacuateur de crue. Sur ce pont circule l'engin de manutention prévu pour :

- l'acheminement et le transport des pièces lourdes sur le barrage ;
- le montage et démontage des pièces de vantellerie ;
- la mise en place et le stockage des batardeaux (prises d'eau et évacuateur) ;
- l'enlèvement des corps étrangers en particulier des bois amenés par le courant.

Les conduites forcées de 4,50 m de diamètre et 45 m de longueur, en tôle d'acier de 15 mm d'épaisseur, relient les prises d'eau aux bâches des turbines, entre les niveaux (52,00) et (36,00). Elles sont équipées chacune d'un joint de dilatation, d'un trou d'homme et reposent librement sur deux appuis intermédiaires.

Le bâtiment de l'usine est formé :

- d'une infrastructure en béton armé qui s'enfonce dans le rocher de fondation de la cote (48,00) jusqu'au fond du puisard à la cote (23,50) ;
- d'une superstructure en béton armé également soutenant les voies du pont roulant.

L'ensemble est chapeauté par une enveloppe légère avec :

- en façade une ossature métallique constituée de piliers-caissons et de lisses supportant un remplissage en dalles de fibrociment ;
- en pignons, des potelets et lisses métalliques armant un remplissage en parpaings de ciment ;
- en couverture, une charpente fer, avec toiture en aluminium.

La différence entre les deux structures est accusée au niveau (48,00) par des passages longitudinaux marquant la séparation entre l'ossature et son chapeau.

Les deux unités de production sont composées chacune :

- d'une turbine « Kaplan » à axe vertical, développant une puissance de 16 300 kW, sous une chute de 30 m, pour un débit d'équipement de 57 m³/s, à la vitesse de 214 tr/mn ;
- d'un alternateur accouplé directement à la turbine, du type à ventilation en circuit fermé. Sous $\cos \varphi = 0,8$, il dispose d'une puissance de 19 millions de VA.

La salle des machines est desservie par un pont roulant de 75 t avec crochet secondaire de 8 t.

La salle de commande est au niveau du plancher supérieur des alternateurs.

Les services auxiliaires locaux des pompes et magasins sont aménagés dans l'infrastructure aval au-dessus des aspirateurs, tandis que les bureaux et les annexes trouvent leur place dans un petit bâtiment accolé à l'amont et indépendant de l'usine.

On notera également les particularités suivantes :

Les aspirateurs des groupes sont équipés pour recevoir des batardeaux métalliques avec possibilité d'une protection complémentaire à partir de piles en béton armé avec rainures à cet effet.

Les manteaux de roue des turbines sont accessibles sur tout leur pourtour et sont démontables et remplaçables.

La réfrigération est assurée par circulation d'eau traitée en circuit fermé, refroidie dans des échangeurs à circulation d'eau brute.

La salle de commande, isolée du bâtiment, repose sur des supports antivibratiles.

Le poste haute tension.

Les installations du poste haute tension sont étagées sur deux plates-formes aux niveaux (48,00) et (54,00) côté rive droite et à proximité immédiate de l'usine.

Équipé de 2 transformateurs 55/90 kV et d'un transformateur 90/30 kV, il fournit au départ l'énergie vers Abidjan, Ayamé et Aboisso.

Exécution des travaux et dérivation de la rivière.

L'exécution des travaux a été répartie dans l'espace et dans le temps en deux grandes phases (I et II), suivies d'une phase de fermeture et d'une phase de déroctages. La phase I s'étend aux ouvrages situés côté rive droite, la phase II aux ouvrages côté rive gauche.

Ces phases s'inscrivent dans le cadre hydrologique ci-après. Compte tenu de la réserve amont, l'année hydrologique a été décomposée en deux périodes :

- la première allant du 1^{er} décembre au 31 mai, et pendant laquelle le débit de dérivation ne devait pas excéder celui turbiné à l'usine amont (114 m³/s) ;
- la seconde s'étendant du 1^{er} juin au 30 novembre et pendant laquelle le laminage des crues dans la réserve rendait possible, suivant les données initiales (crue maximale connue alors 700 m³/s), la limitation des débits restitués à un maximum de 300 m³/s. (On sait qu'il a fallu faire face à la crue de juillet-août 1963.)

On pouvait, bien entendu, songer à tirer parti de l'importante réserve d'Ayamé I pour obtenir une coupure totale et relativement longue du débit de la rivière.

Certains travaux, et tout particulièrement ceux du batardeau de 1^{re} phase, s'en seraient trouvés grandement facilités.

Malheureusement, les moyens de production thermiques n'étaient pas suffisants pour faire face, seuls, aux besoins de la consommation et il s'est avéré impossible de se priver, fût-ce pendant quelques jours, de l'énergie d'Ayamé I.

Tout au plus, le chantier put-il obtenir quelques arrêts de dimanche.

Phase I

(Voir fig. 6 a.)

Fin 1961, démarrage des travaux de rives : fouilles blindées, rive droite, et un peu plus tard, contreforts hors d'eau.

Construction simultanée pendant la période dite sèche, d'un mur batardeau béton rejetant la Bia vers la rive gauche et dégagant dans son lit les emprises de l'évacuateur de crue, de l'usine et celles d'un canal pour la dérivation des eaux en phase II. Dans la partie étranglée du goulet l'écoulement a été amélioré par quelques sautages rocheux.

Edification à l'abri du batardeau béton de l'évacuateur de crue, des prises d'eau et de l'usine.

Le gros œuvre de l'évacuateur rive gauche était conçu, dans sa construction, pour laisser le passage entre ses deux contreforts, au débit dérivé pendant la phase II.

Creusement dans le roc du canal de dérivation que prolongeait le passage sous l'évacuateur.

Passage de la phase I à la phase II. Coupure.

(Voir fig. 6 b.)

La dérivation de phase II a été ouverte par démolition des



Fig. 6. — Exécution des travaux et dérivation provisoire.
Ci-contre : Phase I.
Ci-dessus : Phase II.

- (1) Batardeau des phases I et II.
- (2) Grues G 90 « Pingon ».
- (3) Grues « Pingon ».
- (4) Canal de dérivation provisoire de 2^e phase.
- (5) Batardeau du canal.
- (6) Pont de service.
- (7) Digue amont 2^e phase.
- (8) Digue aval 2^e phase.

parties amont et aval du batardeau béton qui l'obturaient.

La coupure a ensuite été réalisée comme suit :

- construction à l'amont d'un massif en enrochements jusqu'au niveau (46,00) (niveau de 114 m³/s) ;
- arrêt de la centrale d'Ayamé I le dimanche 24 mars 1963 ;
- étanchement du massif ce même jour, par déversement de matériaux latéritiques.

Le batardeau amont de l'enceinte de phase II a ensuite été achevé avec l'édification d'une digue en terre jusqu'au niveau (50,00) (niveau de 300 m³/s), incorporant le massif de coupure.

Quelques difficultés sont apparues pour étancher le massif :

- il n'avait pas été possible de couper complètement Ayamé I, la partie basse du massif était en eau ;

— le rocher de fondation s'est révélé très fissuré.

Faute de pouvoir aveugler complètement quelques venues d'eau à travers ce dernier, le remblai a été cependant mis en place. Le pied et le parement aval de la digue ont été protégés par un filtre drainant.

Pendant la durée du chantier, les seules venues d'eau constatées ont été celles qui provenaient des fissures du rocher et l'ouvrage s'est parfaitement comporté malgré une utilisation prolongée à la limite du surversement. Cela confirme la bonne tenue du matériau latéritique ainsi que son étanchéité.

Phase II.

La coupure réalisée, l'enceinte pour les travaux d'ouvrages en rive gauche a été fermée par une digue aval s'appuyant sur le batardeau béton de 1^{re} phase.

Les travaux à l'intérieur de l'enceinte de phase II comportaient la construction du gros œuvre des vidanges de fond, des contreforts, voûtes et fouilles blindées en rive gauche.

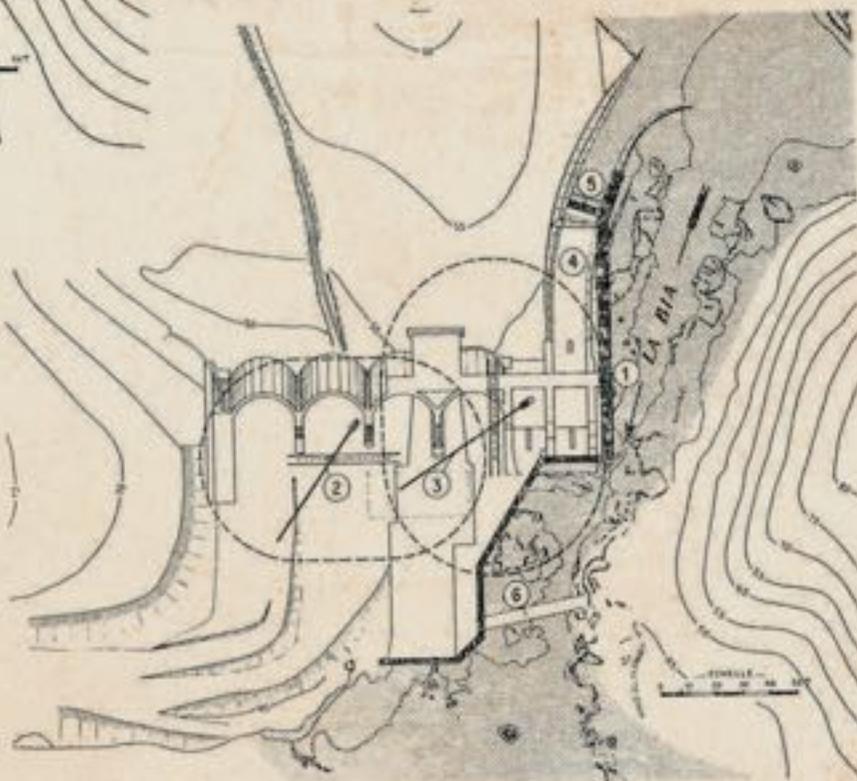
Phase de fermeture.

(Du 15 décembre 1963 au 15 janvier 1964.)

Pour en terminer avec la construction du barrage dont la mise en eau est prévue pour le 15 janvier 1964, les travaux inclus dans la phase de fermeture se répartissent comme suit :

Le dimanche 15 décembre :

- coupure totale à Ayamé I ;



- mise en place de batardeaux métalliques obturant le canal de dérivation à l'amont immédiat de l'évacuateur ; des piles prolongeant les contreforts ont été disposées à cet effet ;
- constitution d'un remblai en terre au niveau (45,00) (niveau 114 m³/s) fermant la partie aval de ce dernier ;
- dérasement de la digue amont ;
- ouverture des vidanges de fond, prêtes à dériver la rivière après remise en route de la centrale existante.

Du 15 décembre au 15 janvier, exécution des travaux de fermeture proprement dits :

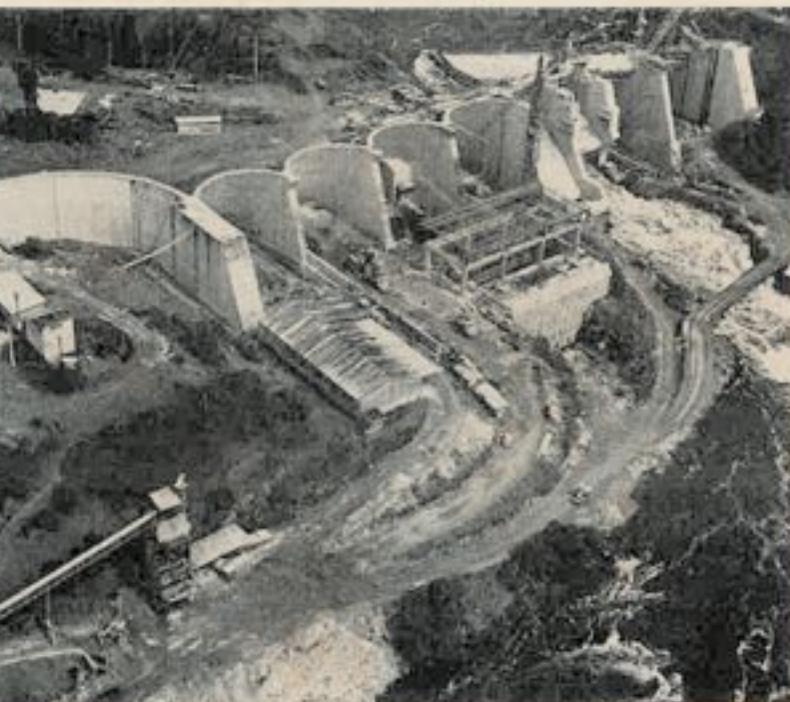


Ensemble
du chantier
rive gauche,
Vue d'aval.
(28 octobre 1963).



↑
Ensemble de l'aménagement, Vue d'amont (28 octobre 1963).

↓
Ensemble de l'aménagement, Vue d'aval (28 octobre 1963).



Agressivité des eaux de la Bia et mesures de précautions.

Les eaux de la Bia, comme celles de toutes les rivières coulant sur un socle cristallin granitique (Afrique de l'Ouest, Massif central, Finlande), sont des eaux faiblement minéralisées, donc agressives vis-à-vis des bétons.

Cette agressivité avait été mise en évidence lors des études préliminaires de l'aménagement d'Ayamé I, et il avait été décidé d'utiliser un ciment résistant à cette agressivité : ciment de laitier au clinker ou ciment pouzzolano-métallurgique.

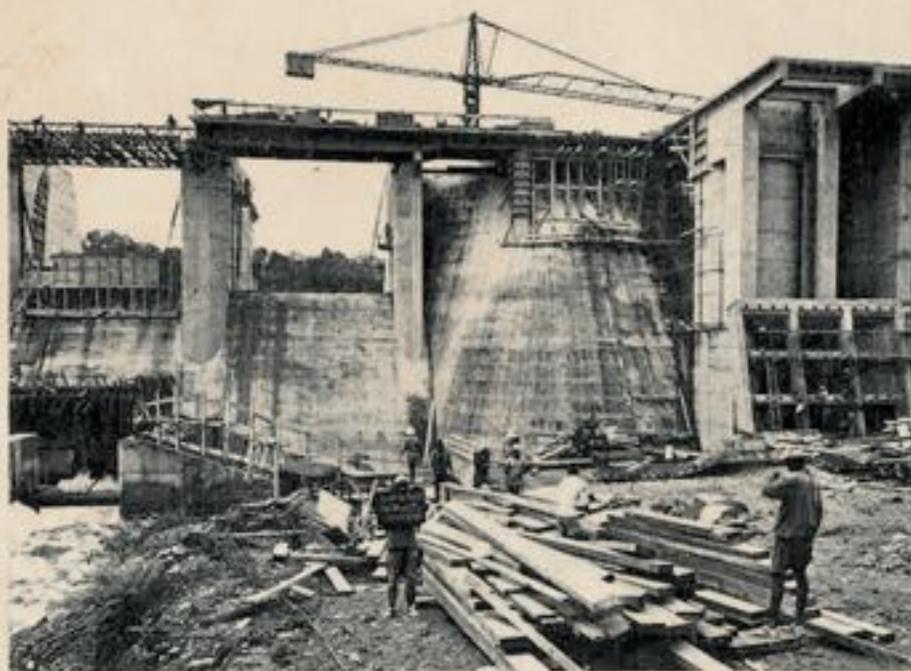
Le choix s'était porté sur le ciment pouzzolano-métallurgique « Fouilloux » aux cendres volantes, qui avait déjà été choisi pour la construction du pont d'Abidjan.

Ce ciment présente une très haute résistance à la désagrégation chimique : sa haute plasticité permet de plus d'obtenir sans excès d'eau de gâchage des bétons extrêmement maniables sans ressuage, présentant par la suite une très grande compacité et une très haute imperméabilité.

Ce ciment avait été choisi de préférence au ciment de laitier au clinker (C. L. K.) à la suite de l'expérience de son usage au pont d'Abidjan.

Après remplissage de la retenue en 1959, et dès la mise en service de l'évacuateur de crue (en saut de ski), un fort dégagement d'hydrogène sulfuré (SH_2) s'est manifesté causant, outre une pollution de l'air, une corrosion sur les ouvrages.

Des études ont été immédiatement entreprises avec le concours de l'O. R. S. T. O. M. (Office de la Recherche Scientifique et Technique outre-mer) pour déterminer les causes du phénomène observé. D'après ces études on s'est trouvé en



Ensemble : évacuateur, dérivation provisoire phase II, voûte et prise d'eau. Vue d'amont (8 août 1963).

- à l'amont, construction du voûte en béton armé;
- à l'aval mise hors eau des ouvrages au-dessus du niveau correspondant à 300 m³/s.

Phase de remplissage.

Du 15 au 31 janvier, remplissage progressif de la retenue et achèvement de la partie aval de l'évacuateur.

Phase de déroctage aval.

Les travaux de déroctage du lit s'inscrivent en saison sèche en jouant avec la retenue du barrage, alternativement remplie et vidée.

La durée de remplissage laisse un délai d'environ 30 h pour la mise à sec à l'aval et l'exécution des travaux. Celle de vidage est d'environ 10 h.

Crues de juillet-août 1963.

En juillet-août 1963 les apports ont été particulièrement volumineux et deux pointes de crues ont été enregistrées :

- l'une de 750 à 800 m³/s le 29 juillet;
- l'autre de 1800 à 2000 m³/s le 4 août;

alors que la retenue amont était à son maximum (environ 91,00).

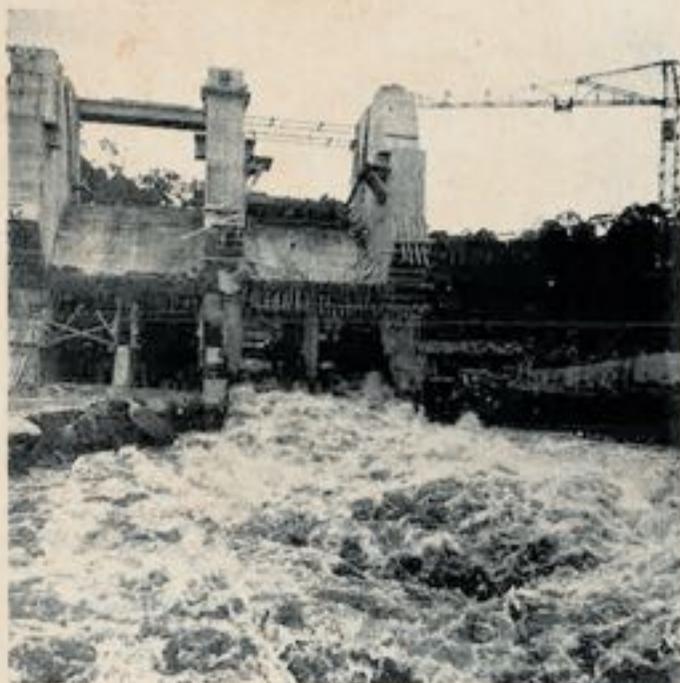
Avec une marge de sécurité encore suffisante, il a été vérifié que le plan d'eau pourrait monter à la cote (92,00) et décidé que l'on emmagasinerait dans cette tranche d'un volume de 200 millions de m³ le surplus de débit que les batardeaux d'Ayamé II ne pouvaient supporter.

Par surélévation de ces derniers, le débit restitué avait été porté de 300 à 375 m³/s.

Enfin, pour assurer la constance de ce maximum à la restitution d'Ayamé I, les vannes de l'évacuateur étaient manœuvrées à chaque variations de la charge des groupes.

Finalement, le plan d'eau est monté à la cote (91,35). Le débit de la rivière est resté élevé et la « petite saison sèche » du mois d'août a été inexistante. Entre autres dispositions prises pour limiter les dégâts d'une submersion à Ayamé II, le parement aval de la digue amont rive gauche avait été recouvert d'un enduit grillagé.

Evacuateur de crue et dérivation provisoire phase II (débit 375 m³/s).
Vue d'aval (20 août 1963).



présence d'un complexe bactérien concernant le cycle du soufre.

Dans un premier stade, le soufre organique provenant de la masse de végétation vivante, inondée, est minéralisé sous forme de sulfates par une première famille de bactéries.

Dans un deuxième stade, des bactéries sulfato-réductrices réduisent ces sulfates avec formation de sulfures et de SH_2 libre.

La première série de prélèvements ayant mis en évidence ce phénomène a été faite en décembre 1959 et janvier 1960. Une deuxième série de prélèvements a été effectuée en décembre 1961, soit deux ans après les premières séries. On a observé une baisse très forte de la teneur en SH_2 libre et une baisse assez nette du nombre de bactéries sulfato-réductrices. Enfin, sur des prélèvements effectués en avril 1962, les résultats ont été totalement négatifs, c'est-à-dire qu'on ne trouve plus trace décelable de bactéries sulfato-réductrices. Il semble bien que le cycle biologique ayant son origine dans le soufre végétal soit sinon disparu, du moins très fortement atténué.

Le léger dégagement de SH_2 qui persiste doit correspondre à l'apport normal de matières végétales vivantes (zone de marnage de la retenue, apports naturels).

Les corrosions actives qui se sont manifestées dès le remplissage de la retenue ont été causées par la superposition de deux phénomènes, l'un chimique, l'autre biologique.

Le phénomène chimique — eaux granitiques peu minéralisées — est lié à la nature même des eaux de la Bia. Il est inductible et permanent et agit essentiellement sur les bétons.

Il est plus actif en climat tropical, car la vitesse de dissolution des cristaux hydratés de ciment est plus élevée qu'en climat tempéré, du fait que les constantes de dissociation des réactions d'hydrolyse ont une valeur qui croît avec la température. Son action sur le parement amont du barrage, en contact avec l'eau, ne peut jamais revêtir une très grande amplitude, et la vitesse du phénomène ne pourra que diminuer au fur et à mesure qu'augmentera l'épaisseur du béton altéré.

La percolation de l'eau de la retenue, à travers les fissures capillaires du béton, pourrait revêtir une forme très grave si les fuites étaient importantes, car on aboutirait à la dissolution complète du liant.

Dans le cas particulier du barrage d'Ayamé I, le parement aval du barrage ne présente pas de fuites importantes, mais seulement de très légers suintements. La très faible surface des traces de carbonates de chaux sur le parement aval met en évidence une faible attaque du béton due au très petit débit des fuites. La sécurité de l'ouvrage n'est pas mise en cause.

Le phénomène biologique — dégagement de SH_2 — est lié à l'existence d'une couverture végétale abondante dans la zone intéressée par la retenue; il a été très actif lors de sa mise en eau; il s'est fortement atténué en 1961 pour disparaître presque complètement en 1962.

La corrosion du matériel a été très forte. Elle est apparue en particulier sur les parties métalliques immergées. Le fer se transformait en oxyde et en sulfures sous forme d'une couche noire à l'aspect du cirage. Les pièces en cuivre étaient également attaquées avec tendance au noircissement par les sulfures. Une révision totale des machines a été effectuée au début 1963. Les travaux ont consisté essentiellement en une métallisation à l'acier inoxydable des parties actives de l'équipement en contact avec l'eau et en une reprise des protections par peintures.

Les dispositions prises qui améliorent considérablement la résistance à la corrosion, jointes au fait que les dégagements de SH_2 ont fortement diminué, doivent permettre d'assurer une

exploitation normale des groupes, sans nouvelles sujétions particulières.

A Ayamé II, les mesures de précautions prises consistent essentiellement :

— pour la protection des bétons :

- à utiliser un ciment de laitier au clinker;
- à soigner particulièrement la cure pendant le durcissement initial (protection superficielle);
- à réaliser une étanchéité élevée en surdosant les bétons en contact avec l'eau de la retenue et en apportant le plus grand soin aux reprises de bétonnage (protection en profondeur);

— pour la protection du matériel :

- en la généralisation de l'utilisation de l'acier inoxydable dans les parties où les travaux de protection sont d'exécution difficile (pièces fixes de la vannerie, parties actives des turbines);
- à largement dimensionner les pièces d'acier (c'est le cas en particulier des tôles des conduites forcées);
- à étancher tous les assemblages et filetages;
- à choisir des produits de protection adaptés;
- peintures aux isocyanates sur les pièces fixes en acier inoxydable des vannes et dans les zones des turbines à grande vitesse de l'eau;
- peintures au chlorure de vinyle pour les vannes et pour les turbines;
- peintures bitumineuses pour les conduites forcées;
- métallisation des tabliers des vannes.



L'aménagement de la chute d'Ayamé II est réalisé pour le compte du Gouvernement de la République de Côte-d'Ivoire

La SOCIÉTÉ ENERGIE ELECTRIQUE DE CÔTE-D'IVOIRE et l'Inspection Générale pour la Coopération Hors Métropole d'ELECTRICITÉ DE FRANCE sont Ingénieurs-Conseils. Les études d'exécution du génie civil ont été confiées au Bureau d'Etudes Séchaud et Metz. Les études architecturales au Cabinet Semichon et Loire, à Paris et à Abidjan.

Les travaux de génie civil sont réalisés par le groupement des Entreprises :

- Société des Entreprises de Travaux Publics A. Borie;
- Société Dumez;
- l'Entreprise Nantaise de Travaux Publics.

Les Constructeurs ci-après participent à l'équipement vannerie conduites forcées :

- Entreprise d'Equipements Mécaniques et Hydrauliques;
- Ateliers Neyrpic.

Turbines :

- Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey;
- Compagnie et Ateliers des Forges de la Loire.

Alternateurs et transformateurs :

- Le Matériel Electrique S.W.

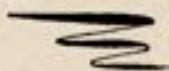
Equipement électrique :

- Société Générale d'Entreprises.

Matériel H. T. :

- Ateliers de Construction Electrique de Delle.

J. VASSIVIÈRE.





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

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

PRO BTP
GROUPE

SMA



L'assureur de toutes les entreprises,
des professionnels, des dirigeants,
de leurs salariés et de leurs proches.

Retrouvez tous nos produits d'assurance sur groupe-sma.fr



SMABTP
BÂTI L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMA VIE

SMA
ASSURANCES

SMA
COURTAGE

SMA VIE
COURTAGE