

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

ENERGIE. CONSTRUCTION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE DE NUNEZ DE BALBOA. FONDATIONS GRAVITAIRES ET TRAVAUX A L'ATERRAGE DU RACCORDEMENT ELECTRIQUE DU PARC EOLIEN EN MER DE FECAMP. LA REPARATION DU BARRAGE DE BOONE DAM EN AMERIQUE DU NORD. UNE USINE DE DESSALEMENT A DJIBOUTI. UN CENTRE DE VALORISATION ENERGETIQUE A IVRY-PARIS XIII. RECUPERATION DE CHALEUR FATALE - BLUE PAPER A STRASBOURG. TRESORS DE NOS ARCHIVES : CHUTE DE MALGOVERT

N°975 JANVIER/FÉVRIER 2022



PARC ÉOLIEN
DE BELWIND AU
LARGE D'OSTENDE
© EIFFAGE

LES TRAVAUX
PUBLICS FÉDÉRATION
NATIONALE

NOUS AVANÇONS SUR LA MÊME ROUTE QUE LES TRAVAUX PUBLICS

Nous connaissons bien votre métier et tous ses risques.
Nous les couvrons avec des garanties adaptées pour mieux vous protéger, mieux vous assurer et vous soutenir en cas de besoin.
Et comme nous faisons aussi partie de la famille du BTP,
nous ferons toujours route commune.



PRO BTP
GROUPE

www.probtp.com



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
Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard
Datry (Setec), Olivier de Vriendt
(Spie Batignolles), Denis Etienne
(Bouygues), Philippe Gotteland (Fnfp),
Florent Imbert (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Vinci),
Romain Léonard (Demathieu Bard),
Claude Le Quéré (Egis), Véronique
Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau
(Soletanche Bachy), Jacques Robert
(Arcadis), Claude Servant (Eiffage),
Nastaran Vivian (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.fr

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

Publicité
Rive Média
10, rue du Progrès - 93100 Montreuil
Tél. : 01 41 63 10 30
www.rive-media.fr

Directeur de clientèle
Bertrand Cosson -
b.cosson@rive-media.fr
L.D. : 01 41 63 10 31

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
ISSN 0041-1906

RÉINVENTER L'ÉNERGIE



© DR

L'énergie est au cœur de l'activité humaine. Que ce soit pour se nourrir, se chauffer, s'éclairer ou se déplacer, l'homme a besoin d'énergie. Fournir de l'énergie, c'est donc contribuer au développement économique et social et au bien être des populations de la planète.

Mais le monde fait face à un double défi.

D'une part, la demande en énergie ne va cesser de croître, sous l'effet conjugué de la croissance de la population - 2 milliards d'habitants supplémentaires d'ici 2050 - et du développement du niveau de vie : songeons que 800 millions d'individus n'ont pas accès à l'électricité !

D'autre part nous devons protéger la planète et ses habitants des conséquences sur le climat des émissions de gaz à effet de serre. Afin de limiter la hausse de la température du globe "bien en-dessous de 2°C" comme le veut l'Accord de Paris, il faut viser une société neutre en carbone dès 2050 pour les pays développés, en 2060 pour la Chine et pas au-delà de 2070 pour tous les autres pays. Les pays en développement doivent donc assurer leur croissance sans suivre le même chemin que le monde occidental. Il conviendra bien sûr de les y aider.

Ce double défi suppose de réinventer l'énergie. Qu'est-ce que cela signifie ?

C'est d'abord tout faire pour limiter la consommation d'énergie en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments, des transports, des procédés industriels et agricoles.

C'est investir massivement pour développer les énergies renouvelables et décarbonées (solaire, éolien, biomasse, hydrogène...) qui doivent constituer le cœur du nouveau système énergétique que nous devons créer.

C'est réduire au strict minimum l'usage des énergies fossiles et stocker le carbone résiduel. À l'horizon 2050, aucun des scénarios de l'AIE n'envisage la disparition complète des hydrocarbures, même s'ils prévoient une forte réduction de la consommation de pétrole et de gaz. Il conviendra de neutraliser les émissions résiduelles de CO₂ par des solutions basées sur des puits de carbone naturels ou par la capture directe de carbone dans l'atmosphère.

Pour y parvenir, il convient d'agir sur la demande. Cette évolution doit être soutenue par des politiques visant à promouvoir la demande en énergies décarbonées ou à renchérir le coût des énergies fossiles à travers un prix croissant du carbone, tout en veillant à ce que ces mesures soient acceptables pour les consommateurs et ne nuisent pas à la compétitivité des entreprises.

Réinventer l'énergie suppose une mobilisation générale de la société dans son ensemble. Entreprises, centres de recherche, communauté financière, gouvernements et société civile doivent travailler main dans la main pour effectuer cette révolution mondiale, la première dans l'histoire de l'humanité.

La transition énergétique constitue une opportunité pour nos entreprises, qu'elles se situent dans les secteurs du bâtiment, du transport ou de l'énergie. Le présent numéro de Travaux fait ainsi la part belle aux énergies du futur, notamment à l'éolien offshore.

Face aux attentes de notre société, qui est à la fois dépendante à 80% des énergies fossiles et désireuse de s'en passer au plus vite, le pragmatisme doit s'imposer. La transition énergétique prendra du temps et nous aurons besoin de toutes les formes d'énergie. Il faut en effet investir massivement dans les énergies de demain tout en continuant à satisfaire la demande d'aujourd'hui fondée sur des énergies fossiles sous peine de devoir faire face à des prix élevés de l'énergie.

La transition énergétique ne peut se faire contre les consommateurs. Elle doit être juste et socialement acceptable. Inciter et favoriser, non pas exclure ou punir.

Réinventer l'énergie, c'est finalement concilier progrès technique, croissance économique et développement durable.

PATRICK POUYANNÉ
PDG DE TOTALENERGIES



ÉNERGIE

LES JACKETS DE FONDATION POUR LE PARC ÉOLIEN OFFSHORE DE BÉATRICE DANS LES HIGHLANDS DU NORD DE L'ÉCOSSE © RAY PRITCHARD/EIFFAGE





04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



16

**ENTRETIEN AVEC
GABRIEL OBLIN**

EDF - EPR2 -
L'AVENIR DU NUCLÉAIRE
N'A JAMAIS ÉTÉ
AUSSI PROMETTEUR



24

**ENTRETIEN AVEC
ANTOINE DE PRÉMONT**

EIFFAGE -
ACTEUR MAJEUR
DE L'ÉOLIEN OFFSHORE

30 ELOGEN - HYDROGÈNE VERT :
LE MONDE DE DEMAIN



38

**CONSTRUCTION
DE LA CENTRALE
PHOTOVOLTAÏQUE**
de Núñez de Balboa
(500 MW)



45

**LES FONDATIONS
GRAVITAIRES DU PARC
ÉOLIEN EN MER DE FÉCAMP**
Une usine de production
à ciel ouvert



54

**LA RÉPARATION
DE BOONE DAM**
Le succès d'une collaboration
face à un projet exigeant
et complexe



62

**CONCEPTION,
CONSTRUCTION ET
EXPLOITATION D'UNE
USINE DE DESALEMENT**
à Djibouti



68

**CONCEPTION/
CONSTRUCTION DU
CENTRE DE VALORISATION
ÉNERGÉTIQUE**
à Ivry-Paris XIII



74

**RÉCUPÉRATION
DE CHALEUR FATALE**
Blue Paper à Strasbourg



78

**LES TRAVAUX À L'ATTER-
RAGE DU RACCORDEMENT
ÉLECTRIQUE DU PARC
ÉOLIEN EN MER**
de Fécamp



84

**TRÉSORS DE NOS ARCHIVES :
CHUTE DE MALGOVERT**
Travaux n°195 - janvier 1951



LA PLUS GRANDE FERME PHOTO-VOLTAÏQUE D'EUROPE À NÚÑEZ DE BALBOA QU'EN PENSENT LES LAPINS ?

Eiffage Energia, pour le compte d'Iberdrola, a construit à Núñez de Balboa, dans la province de Badajoz, une centrale solaire photovoltaïque de tous les records. Elle est composée de 1,4 million de panneaux solaires et sa capacité est de 500 MW. La production est estimée à 832 GWh par an. Dans ce type d'aménagement l'assemblage mécanique permettant l'exposition optimale est un défi majeur. Des dispositifs élaborés ont été mis en œuvre pour la surveillance et le contrôle. L'installation couvre une superficie de 1 000 ha. La préservation de la biodiversité a fait l'objet de soins attentifs. Aux dernières nouvelles, les perdrix et les lapins sont contents. **(Voir article page 38).**



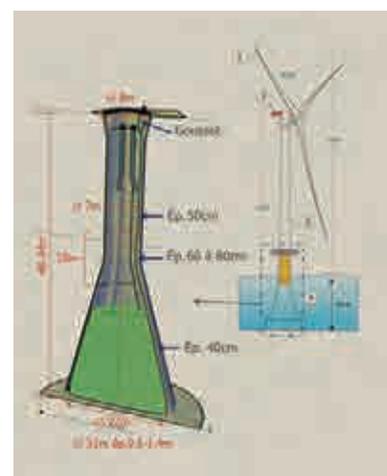
© MISAEAL ANGULO PRIETO



G17

À FÉCAMP PREMIER PARC ÉOLIEN EN MER EN FRANCE AVEC DES FONDACTIONS GRAVITAIRES

Bouygues (mandataire), Saipem et Boskalis réalisent et mettent en place 71 fondations gravitaires de 50 m de haut et d'un poids unitaire de 5 000 t. Ces structures creuses en béton précontraint, remplies de ballast, reposent sur le fond. Leur stabilité est assurée par leur emprise au sol. En cours de fabrication sur un yard au Havre, elles seront posées en mer pendant l'été 2022 au moyen de la barge Saipem 7000, l'un des plus grands navires-grues semi-submersibles du monde. (Voir article page 45).



© BOUYGUES-TP

© BOUYGUES-TP

GÉOTHERMIE PROFONDE : NOUVELLES TECHNOLOGIES, NOUVEAUX PROJETS

Les installations de géothermie profonde gagnent en débit. Neuves ou issues de la rénovation d'anciens puits, elles fournissent une chaleur compétitive par rapport aux énergies fossiles. L'étude de l'Association française des professionnels de la géothermie en fait l'état des lieux.



Forages sub-horizontaux à Cachan (Val-de-Marne) mis en service fin 2020.

La centrale géothermique de Vélizy-Villacoublay (Yvelines), avec deux puits de production au lieu d'un, a été mise en service en octobre. Le débit d'échange dans la centrale atteint 400 m³/h. De l'eau à 65°C est prélevée à 1 600 m de profondeur. La géothermie, avec 16 MW de puissance, va couvrir 66% des besoins de chaleur du réseau Velidis de 19 km (12 000 équivalents-logements)⁽¹⁾. Coût des forages, de la centrale et de la liaison de 1,6 km avec le réseau : 25 millions d'euros HT (moins les aides). Cette configuration d'installation à plusieurs puits est un des exemples d'innovation en géothermie profonde, entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres de profondeur, cités dans l'étude sur la géothermie en France publiée en septembre par l'Association française des professionnels de la géothermie (AFPG).

→ Forages sub-horizontaux

Autre innovation, cette fois à Cachan (Val-de-Marne), mise en service fin 2020 : le forage sub-horizontale, c'est-à-dire en "couchant" l'extrémité du puits de production dans l'aquifère traversé, ce qui augmente la récupération de calories. Ce puits descend verticalement sur 1 000 m puis amorce une déviation de 90° au lieu de 40° "habituellement" pour atteindre la couche visée à 1 600 m de

profondeur (69°C), le Dogger, et l'exploiter sur 1 000 m de long environ.

Le puits de rejet après échange dans la chaufferie est aussi sub-horizontale. Les deux puits ont été forés d'août 2017 à mars 2018. À l'été 2020, ils ont pris le relais des puits datant de 1982-1983. « Nous obtenons une pression meilleure que celle attendue et un débit de 450 m³/h au lieu de 350 auparavant, relate David Petiot, adjoint énergies et mobilités et président de la Société cachanaise de chaleur (Sem avec Dalkia). La température a été un peu basse au départ, vers 62°C, mais elle remonte progressivement. Il se peut que l'ancien puits de rejet, proche, ait créé une bulle froide. La ressource géothermique est une énergie très compétitive à impact environnemental faible. » Le réseau de chaleur alimente 7 600 équivalents-logements. La modernisation de l'ensemble, centrale et boucle géothermale comprises, s'élève à 25,4 millions d'euros HT (moins les aides) pour une puissance de 13,5 MW. Selon l'Ademe, la géothermie est la chaleur renouvelable la moins chère à 15-55 euros par MWh en sortie de centrale.

→ Extraction de lithium

Parmi les innovations, l'étude de l'AFPG signale aussi l'extraction de lithium dans

les eaux géothermales pompées : « Une des idées pour améliorer la rentabilité des puits en géothermie profonde est d'extraire des coproduits, (...) notamment le lithium abondant dans les gîtes géothermiques profonds de la vallée rhénane. Plusieurs sociétés françaises travaillent sur le concept : Eramet, ES (Electricité de Strasbourg), Géolith et Lithium de France. » Le lithium est utilisé dans les batteries électriques automobiles.

Les objectifs officiels en matière de chaleur renouvelable par la géothermie ne sont pas atteints. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) voudrait multiplier par 2,5 la puissance géothermique en 2028 par rapport à 2018. Dans ce cadre, l'étude l'extension du fonds de

garantie au risque d'échec des forages est à l'étude, ce qui permettrait d'exploiter des aquifères au potentiel peu connu.

→ Nombreux projets

La géothermie, à elle seule, assure 1% du total de la chaleur produite. Au sein de la chaleur renouvelable, elle fournit 4% de la production, soit 1% en géothermie profonde et 3% "en surface", de quelques mètres à quelques centaines de mètres de profondeur, le plus souvent à l'aide de pompes à chaleur.

La géothermie profonde a fourni 2 500 GWh de chaleur en 2020 pour un objectif PPE de 2 900 en 2023 et entre 4 000 et 5 200 en 2028.

Le secteur est loin d'être inactif. En Île-de-France, région la plus dense au monde en opérations de géothermie profonde, selon l'AFPG, 54 installations couvrent les besoins de 206 730 équivalents-logements. Onze projets sont en développement pour une exploitation en 2023 ou avant⁽²⁾.

Le Bassin aquitain abrite 17 installations (16 250 équivalents-logements) auxquelles pourraient s'ajouter en 2022-2023 deux à Bordeaux (PGE et Grand Parc).

→ 700 MW de puissance installée

En incluant d'autres bassins notamment en Alsace, 80 installations de géothermie profonde fonctionnent en 2020 à travers 700 MW de puissance. Quarante projets à 2030 ont été identifiés par l'AFPG, dont ceux cités ci-dessus.

En savoir plus sur :

www.geothermies.fr, rubrique outils puis guides et www.syndicat-energies-renouvelables.fr, panorama de la chaleur renouvelable 2021 (13 octobre). ■

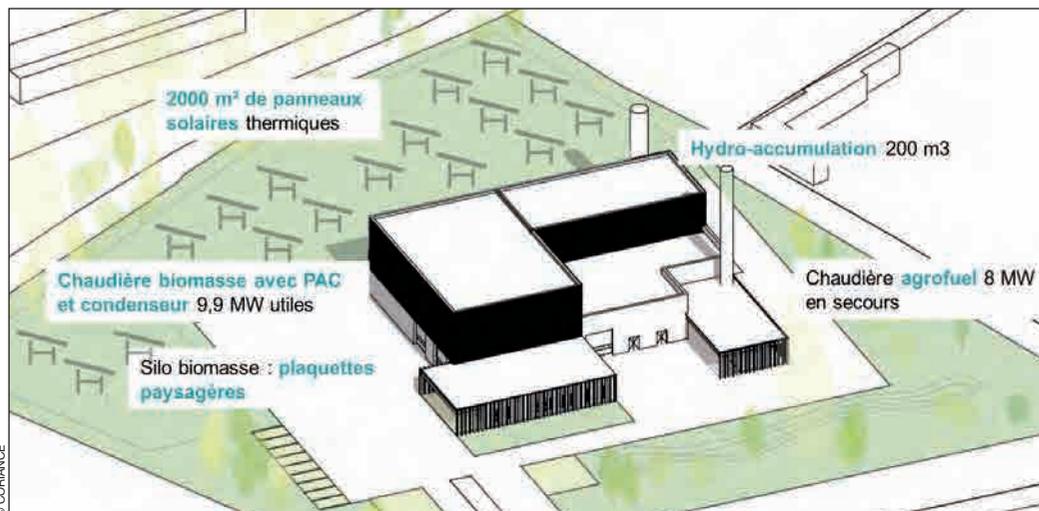
⁽¹⁾ Cf. Travaux n°971, septembre 2021, page 16.

⁽²⁾ Voir page 36 de l'étude.



Centrale géothermique pour le réseau de Vélizy-Villacoublay (Yvelines) inaugurée début décembre.

LA CHALEUR RENOUVELABLE EN ÉBULLITION



Sev, filiale de Coriance, investit 25,5 millions d'euros pour introduire de la chaleur renouvelable sur le réseau urbain de 1970 de Salon-de-Provence (Bouches-du-Rhône) : chaudière à biomasse, chaleur solaire par capteurs thermiques, agrofuel (désouffré) et stockage d'eau chaude. La délégation de service public avec la métropole Aix-Marseille-Provence a débuté le 1^{er} novembre. Les travaux commencent début 2022.

Le 7 décembre, au Grand Rex à Paris, les participants à la Semaine de la chaleur renouvelable étaient tellement nombreux que les organisateurs ont dû changer de salle au dernier moment. 400 personnes étaient inscrites aux deux jours de conférences.

« Le public a bravé la Covid pour venir ici, a noté Gaëtan Remond, directeur associé d'Inddigo. Sa présence montre que la chaleur renouvelable existe. Nous sommes sans cesse attaqués par des organes de pouvoir. Il faut travailler dans la dentelle, la finesse avec plus de concertation. »

« Beaucoup de projets de chaleur renouvelable partent de mauvaises études, il y a beaucoup de contre-exemples, a témoigné Cédric Barnier du Syndicat départemental d'énergie de la Loire-Atlantique (Sydela). Nous avons beaucoup de mal à contrer les préjugés et à expliquer. »

→ Ne pas se focaliser sur l'électricité

« Il n'y aura pas de transition énergétique sans chaleur renouvelable, a assuré Baptiste Perrissin-Fabert, directeur de l'expertise et des programmes de l'Ademe, en introduction de la semaine. La neutralité carbone en 2050 sera atteinte en décarbonant l'énergie et en stockant le carbone. La chaleur renouvelable - bois combustible, chaleur récupérée sur des process, géothermie, solaire thermique - est rentable. Il ne faut pas se focaliser sur l'électricité. Le coût des renouvelables

est plus stable que celui des fossiles. » Les réseaux urbains sont alimentés à plus de 50% par des énergies renouvelables. « Ils peuvent fournir du chauffage et de l'eau chaude à des bureaux la journée et à des logements le soir et le week-end, a précisé Quentin Bulot, chargé de mission réseaux de chaleur et de froid à Amorce, association de collectivités locales. La Cour des comptes juge que le chauffage urbain est insuffisamment développé. »

« À travers l'énergie, les collectivités gagnent en développement local, elles doivent en reprendre la gouvernance, souligne Harold Vandenberghe, chargé de mission réseaux de chaleur et de froid à Amorce. Un projet doit être choisi et piloté par les élus et il faut faire le lien avec le Plan climat, air, énergie territorial (PCAET, intercommunal). »

Golfe Morbihan Vannes Agglomération (GMVA) déroule sa politique en faveur de la chaleur renouvelable en plusieurs axes, à commencer par la réduction des besoins. « La planification sur un territoire permet de massifier, » affirme Moran Guillermic, élu de GMVA.

→ L'avenir est aux petits réseaux

Le potentiel de réseaux alimentés par de la chaleur renouvelable a été estimé par l'association Via Seva (gestionnaires de réseaux et partenaires) avec Manergy. Aux 800 réseaux existants, pourraient s'ajouter plus de 1 400 opérations dont beaucoup de petite taille dans des collectivités entre 3 000 et 30 000 habitants.

Un petit réseau peut se créer autour d'un équipement, par exemple une piscine reliée à un Ehpad et à d'autres bâtiments. « Il faut bien qualifier les besoins, prévoir leur réduction (économie d'énergie), regarder les ressources locales adaptées au projet, éventuellement abandonner l'idée de réseau sans renoncer à la chaleur renouvelable, » propose M. Garnier.

→ Former des spécialistes

Enfin, pour réussir, il convient de former du personnel spécialisé à tous les niveaux, de la maîtrise d'ouvrage à l'entretien. ■

© SPAD/VENHOEVEN/REMINGTONSTYLE/OKRA



Étude de gestion des eaux de pluie sur un écoquartier à Grande-Synthe (Nord) par la Société publique d'aménagement du Dunkerquois avec le groupement d'urbanistes Venhoeven/Remingtonstyle/Okra, Safège et Artémia.

EAUX PLUVIALES : PLAN NATIONAL 2022-2024

Un centre national de ressources "Eau en ville" va être créé par le Cerema. C'est une des actions annoncées par Bérangère Abba, secrétaire d'État chargée de la biodiversité, le 16 novembre, dans le cadre du plan de gestion des eaux pluviales 2022-2024. Gérer les eaux pluviales réduit le risque de pollution de l'eau et les inondations liées au ruissellement sur des sols imperméables. Cette gestion doit être intégrée dans les politiques d'aménagement du territoire.

Des projets pourront être financés avec l'aide de l'État dans le cadre de l'appel à manifestation d'intérêt "Démonstrateurs de la ville durable" (Ademe) doté de 305 millions d'euros. Les agences de l'eau peuvent aussi apporter leur contribution.

La secrétaire d'État a annoncé ces mesures lors d'un déplacement à Lille (Nord) où elle a fait le point sur la concertation relative au schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du bassin Artois Picardie (Nord, Pas-de-Calais et une partie de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise).

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION : RETOUR À 2019

« Nous nous en tirons bien en 2021, nous ne pensions pas que le niveau d'activité serait aussi soutenu et constant, » indique Alain Boisselon, président de l'Union nationale des industries des carrières et matériaux de construction (Unicem).

L'année 2021 analysée à fin octobre devrait rejoindre 2019.

La production de granulats devrait atteindre 360 millions de tonnes à fin décembre et celle de béton prêt à l'emploi (BPE), 40,7 millions de mètres cubes.

Les deux plus importants secteurs abrités dans l'Unicem ont donc remonté de 10% après une mauvaise année 2020.

En 2022, la stabilité est de mise, selon une majorité d'entreprises membres de l'Unicem.

La demande en matériaux sera stimulée par la construction de logements individuels et la reprise des travaux publics prévue au 2^e semestre.

Les chantiers du plan de relance, avec 4 milliards d'euros pour les infrastructures, y contribuent.

Le développement des pistes cyclables et l'extension des réseaux de fibre optique créent de l'activité.

LE BIM AVANCE EN GÉNIE CIVIL ET ESPACES SOUTERRAINS

NORMALISATION BIM

« La norme est l'abstraction d'un savoir-faire pratique à partir duquel on crée des modèles et on revient à la pratique avec une place pour l'interprétation, » a développé Régine Teulier, co-auteur de plusieurs ouvrages sur le Bim, à la journée sur le Bim en génie civil et travaux souterrains (cf. ci-contre).

En Bim, la normalisation concerne en particulier les formats d'interopérabilité IFC (Iso 16739) et les dictionnaires de propriétés (Iso 23386). Elle est élaborée aux niveaux français avec le comité de normalisation PP Bim (Afnor) puis européen au Cen, TC 442, et enfin à l'international, Iso TC59/SC13.

Une centaine de personnes ont assisté à la journée Aftes/AFGC sur le Bim en génie civil et travaux souterrains, le 3 décembre à Paris.

À voir les tableaux Excel à lignes et colonnes multiples, la concrétisation de la démarche Bim force l'admiration et demande concentration chez l'auditoire. Julie Revuz, ingénieure études chez Vinci Construction Grands Projets et Philippe Denechaud, projecteur chez Setec, en ont donné un aperçu à propos de la conception de deux viaducs à vousoirs de 470 m sur la High Speed Two (HS2), ligne TGV de Londres à Birmingham (Angleterre). « HS2 travaille avec la plateforme Bentley et nous avec Catia, a expliqué Julie Revuz. C'était plus simple pour nous de créer une passerelle entre les deux systèmes plutôt que d'adopter Bentley. »

« Si le travail collaboratif autour d'une maquette numérique génère une meilleure

conception, il est important aussi de considérer la vie de l'ouvrage prise en mains par d'autres métiers, a insisté Michel Deffayet, président de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain (Aftes). La chaîne d'informations ne doit pas se perdre. Vingt ans plus tard, il faut comprendre comme si nous étions au moment de la conception. »

« Les IFC servent à stocker des données sur le long terme, » a précisé Michel Rives, pilote d'IFC Tunnel (MIN^D). Le format IFC permet de décrire les propriétés des objets d'un projet et les liens entre eux dans un langage commun aux différents partenaires. « Le format est normé afin de garantir sa pérennité dans le temps, » a affirmé Pierre Benning, codirecteur de MIN^D.

→ Méthodes d'échanges

Le projet national de recherche MIN^D sur le Bim en infrastructures contribue



À lire : "Les normes Bim, genèse," 17 pages, novembre 2021, Plan Bim 2022.

à l'IFC 4.3 incluant les ouvrages non courants⁽¹⁾ dont la norme est attendue en 2023, une fois les contributions nationales remontées à Building Smart International.

« Il n'y aura pas de saison 3 dans MIN^D (2012-2022), a informé Florent Robert, participant à MIN^D et co-animateur avec Nathalie Dias⁽²⁾ du groupe de travail 45 de l'Aftes sur les nouvelles technologies numériques créé en 2019. Le Bim devra inclure les incertitudes des espaces souterrains et le management des risques. Le GT45 vérifie l'adéquation entre outils et normes, et les besoins de la profession. »

Deux axes se développent dans le Bim. « Nous travaillons sur les méthodes d'échanges limités entre partenaires, » a informé Édouard Berton, pilote d'IFC Bridge. « Nous veillons à l'extraction de certaines données uniquement, abonde M. Rives. Ainsi chacun peut-il travailler indépendamment de l'autre, par exemple sur un tablier sans perturber le terrassement. »

→ Systèmes

de positionnement

Autre préoccupation actuelle : l'intégration dans les IFC du système de positionnement des différents objets les uns par rapport aux autres. « Si nous avons un ouvrage avec une route et une voie verte, l'axe de la route n'est plus l'axe du pont, a cité M. Berton. Si l'ouvrage est courbe, les points kilométriques diffèrent de l'alignement. »

<https://buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr> ■



La production de granulats a retrouvé le niveau de 2019 et sera stable en 2022.

⁽¹⁾ Cf. Travaux : n°971, septembre 2021, p. 8.

⁽²⁾ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

PRIX TUNNELS 2021 AITES-ITA : DES GRANDS PROJETS AUX PLUS MODESTES



© KVMFT

La 2^e ligne du transport en commun rapide à Kuala Lumpur (Malaisie) sera souterraine sur 13,5 km.

La 2^e ligne du transport en commun rapide de Kuala Lumpur (Malaisie) a reçu le prix du plus grand projet de l'année de l'Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain (Aites) début décembre.

Le réseau du Klang Valley Mass Rapid Transit s'étend entre un nouveau quartier Kwasa Damansara au nord-ouest de l'agglomération et le centre administratif Putrajaya au sud. Il s'inscrit dans le programme national Economic Transformation.

La Putrajaya line mesure 57,7 km dont plus de 44 en aérien et 13,5 en tunnel (12 tunneliers) à des profondeurs entre 20 et 60 m du fait du croisement avec d'autres infrastructures souterraines. Elle comprendra 36 stations.

La 1^{re} phase des travaux est planifiée au 1^{er} semestre 2022, la seconde début 2023. Coût estimé du génie civil des tunnels : 900 millions d'euros.

Deux chantiers ont été primés par l'Aites dans la catégorie "projet de l'année entre 50 et 500 millions d'euros". À Lioning (Chine), au bord du golfe de

Corée au nord-est du pays, la Ligne 5 du métro comprend un tunnel qui traverse une couche de karst en mer. Cet ouvrage s'inscrit dans la liaison entre la gare de Dalian et celle de Barracuda Bay Sud. Le tunnel de près de 3 km abaisse le temps de trajet de 30 minutes à 3. Les travaux de la Ligne 5, au total 25 km, ont commencé en 2017 et devraient se terminer fin 2023. Coût : 81,8 millions d'euros.

Second projet de l'année primé par l'Aites : l'extension de la Ligne 14 du métro parisien jusqu'à l'aéroport d'Orly (Val-de-Marne). Trois tunneliers ont travaillé simultanément entre avril 2019 et le printemps 2021 pour creuser 14 km de tunnels, 7 stations et 12 puits. Coût : 200 millions d'euros.

→ Recyclage des boues de tunnelier

Le "projet de l'année de moins de 50 millions d'euros" se situe à Hong-Kong. La station d'épuration du secteur de Sha Tin est déplacée dans un espace souterrain. Hong-Kong est construite sur des collines pentues avec un tissu urbain

dense. Les tunnels doivent traverser de la roche. Le succès de cette implantation repose sur une forte coopération entre acteurs. Coût : 27 millions d'euros.

Un dispositif de récupération de matériaux sur boues de tunnelier a été retenu par l'Aites en catégorie "Beyond engineering". Un "kit" est utilisé sur chantier pour séparer les granulats, argiles, eau, etc. Les boues des 49 tunneliers du creusement des 50 km de la Ligne 14 du métro de Shenzhen (Chine) ont été ainsi traitées, ce qui a divisé par deux le volume emporté en décharge.

→ Data center dans une mine

L'Aites a aussi retenu le logement d'un centre de données numériques dans une ancienne mine dans l'Ouest de la Norvège, près de Nordfjord. La mine descend jusqu'à 160 m en six niveaux. Elle offre 75 cavités et 120 000 m². Des géologues ont vérifié qu'elle ne présentait pas de danger.

Webuild a remporté le prix "innovation technique de l'année" (voir page suivante). Enfin, la "jeune personnalité de l'année" est Michael Mains (Canada). ■

NOUVEAU PONT SIEBERT

Le nouveau pont Siebert à Boulogne-Billancourt (Hauts-de-Seine) ouvrira au public en 2025. En 2022, se termineront les travaux d'aménagement de l'ouvrage reliant l'Île Seguin à la rive.

L'ancien pont a été démolé en 2018 considérant la corrosion de ses aciers.

Il avait été construit en 1931 afin de créer une circulation entre les différents ateliers du constructeur automobile, sur l'île, la rive et le bas-Meudon.

Les travaux de génie civil et équipements menés par Chantiers modernes et Tériideal ont démarré en mai 2020 par la réalisation des trois appuis. Les 125 tronçons de la charpente métallique ont été fabriqués chez Baudin Château-neuf à partir d'août 2020 et acheminés, assemblés, soudés, mis en peinture entre décembre 2020 et août 2021. Les travées posées par Baudin Château-neuf et Sarens ont été positionnées en novembre, au-dessus la RD7 (50 m) puis au-dessus de la Seine (bowstring, 100 m).

L'ouvrage a été conçu par RCR Architectes et AEI, avec Ingerop. Il sera fréquenté par des bus, des piétons et des vélos. Sa construction est estimée à 41,5 millions d'euros HT, 29,5 millions étant réglés par Boulogne-Billancourt et Val de Seine Aménagement (SPL), et 12 millions, par le département.



© CD 02/JULIA BRECHLER

Le pont est à charpente métallique comme l'ancien.

PARTENARIAT NUMÉRIQUE

Le Cerema et Infranum ont signé un partenariat au Salon des maires, le 16 novembre. « Les deux partenaires partagent la même volonté de mettre le numérique au service des territoires et sont convaincus de l'importance de la concertation entre acteurs privés et publics au service de l'intérêt de tous, » indique un communiqué.

Infranum est une fédération qui regroupe les professionnels des infrastructures numériques : fabricants de câbles, équipementiers, installateurs et opérateurs. Le partenariat est dans la lignée du programme Ceremalab qui va associer 4 ou 5 territoires de 50 000 à 150 000 habitants, réfléchissant déjà à la gestion de leurs données et à des services publics numériques, et se préparant à devenir des "territoires intelligents et durables".

VINCI RACHÈTE AU CANADA

Vinci Construction a signé un accord pour reprendre des sociétés du groupe canadien Northern Group of Companies, fin novembre. L'acquisition devait obtenir le feu vert des autorités de la concurrence du pays. Les sociétés, spécialisées dans les travaux routiers dans le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse, sur la côte Est, ont réalisé en 2020 un chiffre d'affaires de 65 millions d'euros (93 millions de dollars canadiens).

MÉTRO À TEL-AVIV

Metropolitan Mass Transit Systems a confié à Egis, mandataire du groupement Metav avec Gadish Group, le management du futur réseau de métro de Tel Aviv (Israël). Il s'agit de développer et d'exécuter trois lignes, soit 150 km et 109 stations. Coût estimé : 40 milliards d'euros. Date de mise en service non précisée.

TRAVAUX SOUTERRAINS PAR WEBUILD À TRAVERS LE MONDE



Tunnel d'acheminement des eaux dépolluées du Riachuelo vers le Rio de la Plata au bout duquel elles remontent dans le lit du fleuve (Argentine).

© WEBUILD

Webuild a remporté le prix de l'innovation technique de l'Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain (Aites) pour un dispositif participant à la dépollution de la rivière Matanza-Riachuelo en Argentine, à Buenos Aires, pour le compte d'Agua y Saneamientos Argentinos (Aysa). Le Rio de la Plata dans lequel le Riachuelo se jette, est connu pour sa pollution notamment à cause des métaux drainés par ses affluents. Webuild a imaginé de faire transiter les eaux du Riachuelo dans deux stations d'épuration puis dans un tunnel sous le lit du Rio de la Plata d'où elles ressortent grâce à des "cheminées" et des diffuseurs.

Le système comprend des puits en amont, de 50 m de profondeur d'où part un tunnel de 4 m de diamètre et 12 km sous le fleuve. Sur le dernier 1,5 km, 34 puits de 27 m de haut font remonter les eaux jusqu'au lit du fleuve. L'innovation, baptisée "riser concept", réside dans le système de creusement vertical à partir du tunnel, de bas en haut et en réalisant le tubage au fur et à mesure.

→ Stade de la coupe du monde de foot

Par ailleurs, le groupe autrichien, très impliqué dans le tunnel de base du Brenner (BBT), liaison ferroviaire de 55 km avec l'Italie⁽¹⁾, signale l'arrivée à bon port du tunnelier Serena qui a creusé 14 km du tunnel de reconnaissance côté italien, en 3,5 ans.

Toujours sur le BBT, la filiale suisse de Webuild, CSC, s'est vu confier en novembre par la société européenne BBT SE le lot H41, section en Autriche, entre Gola del Sill, près d'Innsbruck, et Pfons plus au sud. Seront creusés deux tunnels parallèles, 7,3 km de façon traditionnelle et 16,5 km par un tunnelier de plus de 10 m de diamètre.

Egalement en novembre, a eu lieu la cérémonie d'ouverture du stade Al Bayt à une cinquantaine de kilomètres de Doha (Qatar), destiné à la coupe de monde de football de 2022 (capacité : 60 000 spectateurs). Webuild, à l'époque Salini-Impregilo, en consortium avec Galfa et Cimolai, l'a conçu et construit. Coût estimé : 770 millions d'euros (2014).

→ Hydro électricité en Australie

Le groupe autrichien fait aussi partie de la joint-venture comprenant Lough et Lane Construction, qui modernise le complexe hydro-électrique Snowy, en Australie. Un ensemble de 16 barrages situés en Nouvelles Galles du Sud (sud-est du pays) a été construit pour l'irrigation et la production d'électricité entre 1949 et 1974.

Le projet Snowy 2.0 vise à relier le réservoir de Tantangara à celui de Talbingo, soit 27 km et à implanter une usine électrique de turbines à 800 m de profondeur. Quand la demande en électricité est forte, l'eau est lâchée depuis le réservoir de Tantangara vers celui de Talbingo, plus bas. Puis, quand il n'y a plus d'appel d'électricité sur le réseau, une pompe remonte l'eau pour qu'elle puisse resservir⁽²⁾. Un des 3 tunneliers a commencé à creuser 2 km début décembre. Fort de ce projet et d'autres en Australie, Webuild a ouvert un second bureau en Australie dans la région de Melbourne. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux, n°931, mars 2017, page 6.

⁽²⁾ Principe de la station de transfert d'énergie par pompage.



Le tunnelier Serena (6,85 m de diamètre), ici chez d'Herrenknecht, a creusé 14 km du tunnel de reconnaissance du Brenner Tunnel entre l'Autriche et l'Italie.

© HERRENKNECHT

VILLENEUVE-LA-GARENNE RÉAMÉNAGE UN QUARTIER



© VILLE DE VILLENEUVE-LA-GARENNE

À Villeneuve-la-Garenne (Hauts-de-Seine), le triangle de la Bongarde est cerné par la Seine et l'autoroute A 86, et surplombé par des lignes à haute tension qui vont être enterrées.

« Le trophée de l'innovation urbaine donne de la visibilité à notre projet et à la ville, » observe Benjamin Maguères, chargé d'opération au service aménagement de Villeneuve-la-Garenne (24 000 hab., Hauts-de-Seine), une des communes lauréates du prix interdépartemental de l'innovation urbaine des Hauts-de-Seine et des Yvelines remis le 13 octobre.

Le trophée concerne une grande partie du quartier de la Bongarde bordé par la Seine à l'est, coupé du centre-ville par l'autoroute A86 et surplombé de deux lignes à haute tension. Pylônes et câbles vont être enfouis avant les jeux olympiques

de 2024, ce qui va libérer des surfaces.

→ Opérations parallèles

Ce triangle fait l'objet depuis le milieu des années 2000 de plusieurs opérations parallèles, au fur et à mesure des disponibilités foncières, à commencer par la Zac de Bongarde qui abrite depuis 2014, le centre commercial Quartz et 280 logements (2018-2020).

L'opération récompensée cette année pour son caractère innovant concerne deux périmètres : celui de deux emprises relevant du projet d'écoquartier, lauréat d'Inventons la métropole du Grand Paris, en 2016, et un périmètre plus large qui fera du triangle un véritable quartier avec

activités, logements, loisirs, ferme urbaine, maison de santé, halle alimentaire, etc. Un protocole de développement sur 7,5 ha a été signé entre la ville et les promoteurs Sogeprom Habitat et Vinci Immobilier.

→ Passerelle envisagée

Une passerelle est envisagée au-dessus de l'A86 en direction d'un grand ensemble et du centre-ville. Ce secteur de Villeneuve-la-Garenne a été occupé par des carrières et des activités de ferraille et de carrosserie. Suite à un diagnostic des terrains, des dépollutions vont avoir lieu. Enfin, il sera à moins d'1 km de la Ligne 15 du Grand Paris Express, station Les Grésillons à Gennevilliers. ■

PRIX INNOVATION URBAINE DANS L'OUEST DE L'ÎLE-DE-FRANCE

Onze collectivités ont été distinguées par un trophée de l'innovation urbaine décerné par les départements des Hauts-de-Seine et des Yvelines, le 13 octobre. C'était la 3^e édition de ce prix interdépartemental créé en 2019.

Villeneuve-la-Garenne (Hauts-de-Seine) a reçu un trophée (voir ci-contre) dans la catégorie Innovations programmatiques et fonctionnelles aux côtés de :
- Fontenay-le-Fleury (Yvelines) : reconstruction de la Halle du marché ;
- Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) : résidence Coliving ;

- Nanterre (Hauts-de-Seine) : rénovation du Parc Sud (grands ensembles, 13 500 hab.).

→ Bassin écologique

Dans la catégorie Innovations architecturales, paysagères et environnementales, ont reçu un trophée :

- Boulogne-Billancourt (Hauts-de-Seine) : École des sciences et de la biodiversité ;
- Chaville (Hauts-de-Seine) : Maison des jeunes et de la culture ;
- Levallois (Hauts-de-Seine) : bassin écologique naturel, Parc de la Planchette ;

- Goussonville (Yvelines) : terrain ludique et jardin pédagogique.

→ Espace culturel

Trois villes ont obtenu un trophée, catégorie Innovations partenariales et collaboratives :

- Asnières-sur-Seine (Hauts-de-Seine) : Le Cèdre (espace culturel) ;
- Bagneux (Hauts-de-Seine) : requalification du quartier Nord ;
- Saint-Rémy-l'Honoré (Yvelines) : espace modulable collaboratif en mairie. ■

CENTRE D'ESSAIS DE BATTERIES

Le centre d'essais ISP (Allemagne) de l'industrie automobile se dote de nouveaux locaux pour tester des batteries pour véhicules électriques. La 1^{re} phase du Battery Test Centre (BTC), situé à Salzbergen en Basse-Saxe, au nord-ouest du pays, a été inaugurée en 2021. La 2^{de} phase sera terminée à la mi-2022.

ISP est également présent en France à Grand-Couronne près de Rouen (Seine-Maritime) et à Shanghai (Chine).



© ISP

La 1^{re} partie du centre de tests est sortie de terre en 2021.

AVIS DE L'AIE

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a remis son rapport (211 pages en anglais) sur la politique énergétique française le 30 novembre à Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique.

Selon le ministère, il conforte les grandes orientations d'une politique fondée sur le renforcement des efforts en matière d'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables et le maintien d'une production nucléaire.

Fatih Birol, directeur exécutif de l'AIE, pense que : « le gouvernement doit se concentrer sur le climat mais également (...) augmenter la disponibilité des matières premières stratégiques nécessaires aux technologies énergétiques propres et préparer son infrastructure aux nouveaux carburants (bas carbone). »

**PLATEFORME
INGÉNIERIE DES
TERRITOIRES**

Les ingénieurs, élèves ou en poste, ont créé une plateforme internet d'échanges pour un aménagement durable innovant des villes et territoires. L'Association des ingénieurs territoriaux de France, celle des diplômés de l'École nationale des travaux publics de l'État et le Syndicat national des ingénieurs des travaux publics de l'État et des collectivités territoriales l'ont annoncé sur le Salon des maires (novembre).

Sur cette plateforme, seront discutées et échangées « des propositions d'actions et d'aide à la décision pour les décideurs publics, des solutions de long terme aux préoccupations immédiates, des contributions aux transitions écologique, énergétique et à l'adaptation à notre cadre de vie. »

www.ingenierie-territoires.fr

**GRUE SUR
CHENILLES**

La grue sur chenilles LR 1400 SX peut lever jusqu'à 400 tonnes. Le nouveau modèle de Liebherr a été dévoilé en novembre. L'engin pèse 46 tonnes et se replie pour le transport.

Le constructeur a porté une attention particulière à la sécurité d'utilisation. Le conducteur est en permanence informé si sa manœuvre approche une limite dangereuse ou non.



La LR 1400 SX peut lever jusqu'à 400 tonnes.

EXTENSION DE LA CENTRALE ÉLECTROGÈNE DE BOUILLANTE (GUADELOUPE)



La centrale électrogène sur géothermie de Bouillante (Guadeloupe) fonctionne avec succès depuis 1984.

Trois nouveaux forages ont commencé en novembre près de la centrale géothermique électrique de Bouillante (Guadeloupe) afin d'en augmenter la puissance. Une centrale de 12 MW viendra s'ajouter à l'existante de 15,5 MW en 2023 si les procédures administratives aboutissent (enquête publique, etc.) et si les travaux se passent bien.

La centrale de Bouillante est implantée sur un gisement près du volcan de la Soufrière. Un mélange d'eau de mer et d'eau de pluie se vaporise au contact de roches à 250°C⁽¹⁾, une température pro-

pice à la production d'électricité avec une récupération possible de chaleur.

En 2020, la centrale, dans sa taille actuelle, a fourni 115 GWh électriques, soit 7% de l'électricité utilisée en Guadeloupe. Cette part monterait à 12-13% avec l'extension.

L'installation qui a commencé à produire en 1984 avec 4 MW, est désormais exploitée par la Société Géothermie Bouillante, filiale d'Ormat Technologies. Le procédé d'échange entre fluide géothermique et fluide secondaire est basé sur le cycle de Rankine.

Bouillante est une des deux centrales électrogènes géothermiques citées dans l'état des lieux de l'Association française des professionnels de la géothermie (AFPG, cf. page événement des actualités). La seconde, plus modeste avec 1,7 MW et 4 puits, se trouve à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin).

Pilote à partir de 1987, elle s'inscrit dans un programme européen de recherche et développement dont les partenaires sont réunis dans le groupement européen d'intérêt économique "Exploitation minière de la chaleur".

S'intéressent aussi à cette production d'électricité La Réunion, La Martinique et Mayotte. Des industriels sont impliqués en métropole.

→ 24 MW espérés en 2023

L'AFPG chiffre à 166 MW le potentiel de géothermie électrogène français en incluant les 2 centrales existantes, un niveau bien supérieur à la trajectoire de la programmation pluriannuelle de l'énergie (24 MW en 2023 et 2028 installés). Toutefois, elle relativise l'avenir : « En pratique, il est probable qu'une faible proportion des permis déposés donneront lieu à de réelles installations. »

L'association espère que la production conjointe de lithium stimule celle d'électricité géothermique. ■

⁽¹⁾ Cf. La géothermie, quelles technologies pour quels usages ? Ademe, BRGM novembre 2008.

RECRÉER UNE ROCHE CONTRE L'ÉROSION

À La Rochelle (Charente-Maritime), le musoir de l'épi du Pont-Neuf a été protégé de l'érosion par un dispositif formé de gabions enterrés dans le sable sur lesquels, avec le temps, vont venir se sédimerter coquillages, sables, galets.

La sédimentation a lieu par réaction électrochimique entre le métal des gabions, l'eau de mer et ces matériaux. De la calcite se forme et vient agréger l'ensemble, formant à terme des rochers artificiels à partir de composants naturels.

Le dispositif appelé Géocorail, ici posé autour d'un massif d'encrochements en épi, évite le phénomène d'affouillement par les vagues en pied de la barrière rocheuse.

Les gabions, une fois que leurs pierres se seront agglomérées, pèseront de 10 à 60 kg contre 1 à 3 tonnes pour des rochers.

La sédimentation d'éléments minéraux persiste dans le temps. Si la couche minérale subit un choc, elle se reconstitue.

→ Un dispositif suivi

Le procédé mis en œuvre à La Rochelle résulte d'une coopération entre Géocorail et France Maccaferri (gabions et mise en œuvre) avec la communauté d'agglomération de La Rochelle. Le chantier a été dimensionné par le Cerema, il est suivi par SCE Creocéan, et réalisé en partenariat avec Eiffage. Le 19 novembre, a eu lieu une visite sur place. ■



Les gabions sont enterrés dans le sable et vont former à terme une couche de protection à l'érosion.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

Considérant la situation sanitaire, nous invitons les lecteurs à toujours vérifier par internet que les événements annoncés dans cette rubrique sont maintenus, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou à distance).

• 24 FÉVRIER

3^e forum des travaux publics

Lieu : Paris
acteurspourlaplanete.fntp.fr/forum

• 10 MARS

Durabilité des armatures en inox

Webinaire : 10h-12h
www.construiracier.fr

• 15 AU 17 MARS

Transport sédimentaire rivières et barrages réservoirs

Lieu : EDF Chatou et Palaiseau (Île-de-France)
www.barrages-cfbr.eu

• 17 MARS

Maintenance et sécurité des ponts en Europe

Lieu : Bruxelles (Belgique)
www.afgc.asso.fr

• 23 ET 24 MARS

4^e assises de la construction métallique (APK)

Lieu : ESTP Cachan (Val-de-Marne)
https://asso-apk.org

• 29 ET 30 MARS

Le grand défi écologique

Lieu : Angers (Maine-et-Loire)
www.legranddefieecologique.ademe.fr

• 5 AU 7 AVRIL

13^e rencontres géosynthétiques

Lieu : Saint-Malo (Ille-et-Vilaine)
www.rencontresgeosynthetiques.org

• 2 AU 5 MAI

20^e conférence internationale ISSMGE

Lieu : Sydney (Australie)
https://icsmge2021.org

• 25 AU 27 MAI

Défis des structures existantes ou futures

Lieu : Prague (République tchèque)
https://iabse.org/prague2022

• 27 MAI AU 3 JUIN

27^e congrès, Commission internationale des grands barrages, et réunion du Comité français des barrages et retenues

Lieu : Marseille
https://cigb-icold2021.fr/fr

• 31 MAI ET 1^{er} JUIN

Ville sans tranchée

Lieu : Paris (Parc floral)
www.salon-villesantranchee.com

• 9 ET 10 JUIN

Journées de la géothermie

Lieu : Aix-les-Bains (Savoie)
www.afpg.asso.fr

• 28 ET 29 JUIN

Salon des maires

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

• 28 AU 30 JUIN

11^e journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

Lieu : Lyon (Cité internationale)
https://jngg2022.sciencesconf.org

FORMATIONS

Fusion

Le pôle Environnement, ville, architecture, digital (Eva) a fusionné avec Adig, centre de formation sur l'expertise digitale. Le pôle Eva forme des acteurs de la création et de la transformation des milieux habités, et prône l'interprofessionnalité. Peuvent s'y perfectionner les architectes, ingénieurs, urbanistes, paysagistes, économistes qu'ils viennent du privé ou du public. Parmi les journées de formation proposées, citons celle sur la mise en place d'une démarche Bim en gestion, exploitation et maintenance, et les deux jours d'introduction au City information model, modeling, management (Cim).
www.poleformation-idf.org

• 22 AU 24 MARS

Accompagner l'organisation d'un projet et communiquer avec efficacité

Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 28 ET 29 MARS

Bim pour l'ingénierie

Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

• 1^{er} AU 30 AVRIL

Fondamentaux du Bim

Lieu : à distance
https://formation-continue.enpc.fr

• 11 ET 12 AVRIL

Bim : mise en place du processus collaboratif

Lieu : Paris
https://formation-continue.enpc.fr

NOMINATIONS

ANRU :

Anne-Claire Mialot succède à Nicolas Grivel à la direction générale de l'Agence nationale de la rénovation urbaine.

BOUYGUES BÂTIMENT FRANCE EUROPE :

Fabrice Denis a été nommé à la tête du pôle Construire autrement.

BOUYGUES CONSTRUCTION :

Amélie Quidor est la nouvelle directrice des ressources humaines. Rappelons que Pascal Minault a succédé à Philippe Bonnavé comme PDG, en août dernier.

FRANS BONHOMME :

Nicolas Marty prend la suite de Cyril Chaudron en tant que directeur juridique, assurances, immobilier et relations sociales du distributeur.

INFRANUM :

La fédération des métiers des infrastructures numériques est désormais présidée par Philippe Le Grand à la suite d'Etienne Dugas.

SNBPE :

Olivier Collin, directeur général d'Edycem depuis un an, est le nouveau président du collège Syndicat national du béton prêt à l'emploi de la région Pays-de-la-Loire. Il succède à Philippe Queneau, ancien directeur général de la même société.

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

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



Bertrand COSSON

Tél. 01 41 63 10 31

b.cosson@rive-media.fr

Prochains numéros :

• TRAVAUX n° 976 "Maintenance des infrastructures"

• TRAVAUX n° 977 "Travaux souterrains"

ERRATUM TRAVAUX n°973

Deux erreurs se sont glissées dans l'article AMENAGEMENT HYDRO-ELECTRIQUE DE ROMANCHE-GAVET publié dans le numéro 973.

Page 41 en tête d'article et page 47 dans les résumés en anglais et espagnol, les auteurs sont "Pedro Fonseca, directeur opérationnel, Spie batignolles génie civil - Florian Picchioni, directeur de production, Dodin Campenon Bernard".

Page 46, la légende 6 est "Montage de l'un des deux tunneliers", "Assembly of one of the two TBMs".

EDF – EPR2

L'AVENIR DU NUCLÉAIRE N'A JAMAIS ÉTÉ AUSSI PROMETTEUR

Avec l'annonce par Emmanuel Macron de la relance de la construction de réacteurs et la présence de projets nucléaires dans le plan d'investissement France2030, l'atome revient sur le devant de la scène française. Une dynamique dans laquelle s'inscrit EDF avec sa proposition de programme de construction de trois paires d'EPR2, une version optimisée de l'EPR de Flamanville. Gabriel Oblin, Directeur du projet EPR2 nous explique comment EDF et la filière nucléaire française se sont préparées, déjà de longue date, à répondre à ce défi.

Entretien avec Gabriel Oblin, directeur du projet EPR2 d'EDF. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON

1- Gabriel Oblin, directeur du projet EPR2 d'EDF.



Que représente la filière nucléaire française et comment est-elle organisée ?

En quelques chiffres, la filière nucléaire française c'est 220 000 salariés, 3 200 entreprises, 50 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2020 dont 10 milliards à l'exportation avec, à côté des grands groupes de génie civil, de très nombreuses ETI et PME (85 %) implantées partout sur le territoire et qui disposent d'un savoir-faire très particulier dans le domaine du nucléaire.

Fait unique dans le monde, cette filière couvre l'ensemble du cycle du nucléaire : de l'amont, avec Orano, qui assure l'approvisionnement et l'enrichissement de l'uranium (puis leur retraitement en fin de cycle), ou encore Framatome qui fabrique en France les gros composants comme les cuves ou les générateurs de vapeur et les assemblages combustible ; à la conception,

la construction puis l'exploitation et la déconstruction des centrales par le Groupe EDF, appuyé par des compétences issues des entreprises de toute la filière ; jusqu'à la gestion long terme des déchets, avec l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs). Sans oublier la recherche avec le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique).

Lancer le programme de construction de 3 paires de réacteurs EPR2 en France, c'est assurer, pendant la phase construction, plus de 30 000 emplois et 7 000 emplois pendant la phase exploitation. Cette filière est très complète et c'est sa grande force.

Depuis 2018, elle est organisée au sein du Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire (GIFEN), qui coordonne et anime l'ensemble de ses actions. Le GIFEN donne de la visibilité sur la charge de la filière, essentiel pour



- 2- Entreprises de la filière : le bâtiment du combustible.
- 3- La plus grande grue au monde pose le " liner cup " du réacteur à Hinkley Point.
- 4- Le cycle du combustible nucléaire : de l'extraction au recyclage.
- 5- Le chantier d'Hinkley Point "Unit 2 reactor" au Royaume Uni.

GABRIEL OBLIN : PARCOURS

Ingénieur diplômé de l'École Polytechnique (1996) et de l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA 2002), Gabriel Oblin débute sa carrière à EDF en 2002 à la centrale nucléaire de Cattenom, en tant que formateur dans le domaine exploitation.

En septembre 2004, il devient responsable de projets d'arrêt de tranche sur ce même site.

En février 2007, il rejoint la centrale nucléaire de Civaux, en tant que chef du service conduite et occupe cette fonction jusqu'en février 2010, avant de prendre un poste d'auditeur senior au sein de la Direction de l'audit corporate jusqu'en août 2012.

Il est ensuite nommé chargé de mission auprès du Directeur exécutif Groupe production/ingénierie et Asie Pacifique en septembre 2012. Poste qu'il quitte en septembre 2014, pour rejoindre le projet EPR2.

Gabriel Oblin est Directeur du projet EPR2 au sein d'EDF depuis octobre 2014.

le maintien des compétences dans la durée, donne de la cohérence sur sa digitalisation, harmonise les pratiques et promeut l'amélioration dans le domaine de la qualité et de la sûreté, coordonne les actions à l'exportation.

Le GIFEN est l'unique syndicat professionnel de la filière nucléaire et regroupe les grands donneurs d'ordre, les grandes entreprises, les ETI, PME, TPE et associations qui couvrent tous les types d'activités industrielles et tous les domaines du nucléaire civil.

Avec près de 270 adhérents, le GIFEN a pour objectif de construire, avec ses partenaires, l'industrie nucléaire française de demain. Il a également pour ambition de favoriser et de développer les relations internationales entre les acteurs mondiaux du nucléaire civil.

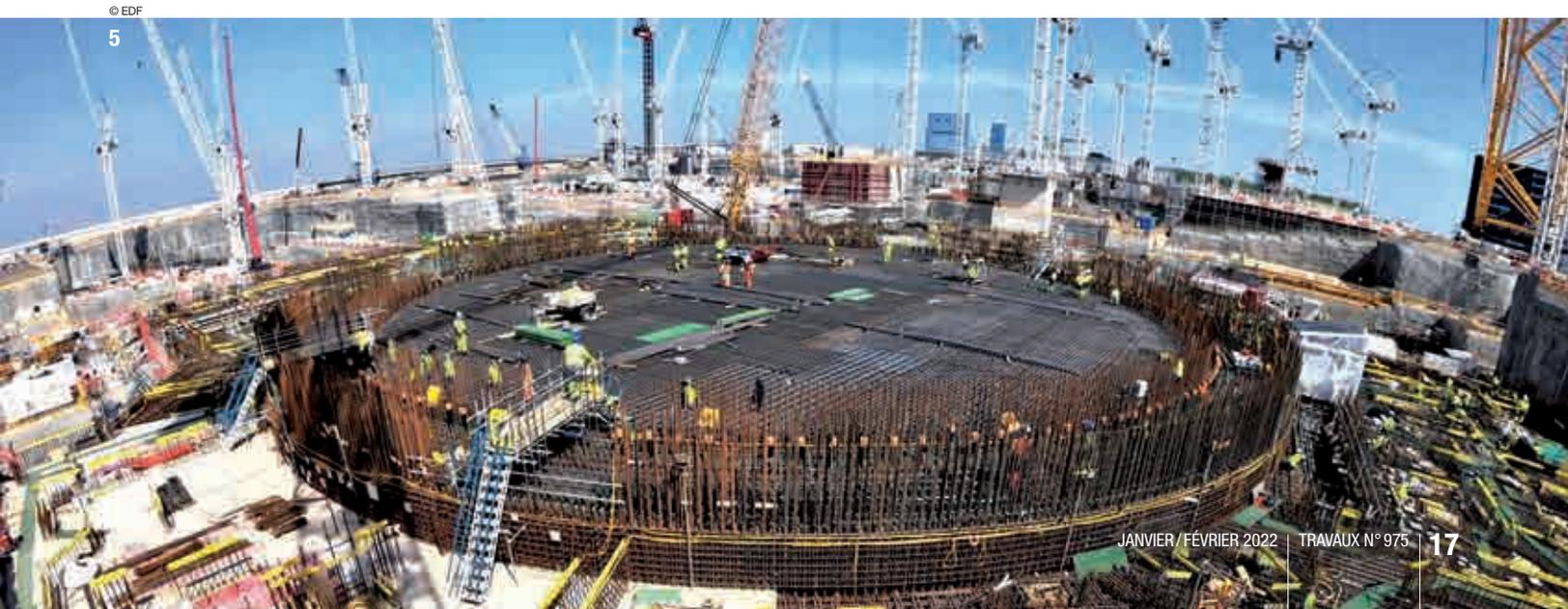
EDF et la filière nucléaire portent aujourd'hui un projet : la construction de 6 nouveaux EPR optimisés en France, dont le lancement pourrait être décidé par l'État dans les prochains mois. Pouvez-vous nous en dire plus ?

Le projet EPR2 tel qu'EDF le réalise aujourd'hui vise à répondre à une demande que nous avons eue dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) fin 2018 qui était de remettre aux pouvoirs publics une proposition pour construire trois paires de réacteurs nucléaires en France.

Cette demande de la PPE nous a conduits à remettre en avril 2021, conjointement avec les autres acteurs de la filière nucléaire française, notre proposition pour construire trois paires d'EPR2 avec une première paire sur le site de Penly, en Normandie, une deuxième sur celui de Gravelines, près de Dunkerque, dans les Hauts de France, ▷



© EDF 4



© EDF 5

et la troisième sur celui de Bugey ou de Tricastin, en Auvergne - Rhône-Alpes. La décision de lancement de ce programme et le choix définitif d'implantation de ces réacteurs appartient au pouvoir politique. De notre côté, nous sommes prêts à lancer la construction de ces réacteurs, grâce au travail réalisé depuis plusieurs années avec Framatome et les autres entreprises de la filière, et aux avancées permises par le plan Excell, notamment en termes de qualité et de performance.

La proposition remise à l'État couvre l'ensemble des volets industriels, financiers, planning, risques... afin de permettre aux pouvoirs publics de disposer de toutes les informations nécessaires pour pouvoir prendre une décision. Même si celle-ci n'a pas encore été prise, le Président de la République dans son allocution du 9 novembre 2021 a notamment indiqué qu'il visait de relancer la construction de réacteurs nucléaires en France comme deuxième composante du mix énergétique aux côtés des énergies renouvelables. C'est donc très encourageant.

Cette proposition de construction de 3 paires de réacteurs s'inscrit clairement dans ce qui est la raison d'être du groupe EDF : « *construire un avenir énergétique neutre en CO₂, conciliant préservation de la planète, bien-être et développement, grâce à l'électricité et à des solutions et services innovants.* » Face à l'urgence climatique, il est important de disposer d'un modèle énergétique toujours moins émetteur de CO₂, plus efficace, plus respectueux de l'environnement et des populations. Un mix électrique composé d'énergies renouvelables et de nucléaire permettrait sans aucun doute d'aider à atteindre l'objectif zéro carbone que s'est fixé la France à l'horizon 2050.

LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

Avec 56 réacteurs en exploitation, répartis sur 18 sites nucléaires, la France dispose du parc nucléaire le plus important du monde en proportion de sa population. Chaque année, environ 400 TWh d'énergie nucléaire sont produits.

Le nucléaire s'est développé en France à partir de 1963. Après avoir testé la technologie graphite-gaz (1^{re} génération) en construisant neuf réacteurs de ce type, la France a décidé en 1968, pour des raisons techniques et économiques, de se tourner vers la filière à eau sous pression (2^e génération), conçue et développée par les États-Unis.

L'impact du choc pétrolier de 1973 a conduit le gouvernement Messmer à engager un programme de construction de 16 réacteurs de 900 Mégawatts électriques (MWe), suivi à partir de 1976, de 20 réacteurs supplémentaires de 1 300 MWe. Entre 1996 et 2000, 4 autres réacteurs de 1 450 MWe ont été mis en service, portant la puissance installée du parc à 63,2 GWe.

Un réacteur EPR (3^e génération) d'une puissance de 1 650 MWe - est actuellement en construction sur le site de la centrale de Flamanville. D'autres sites nucléaires existent en France, mais ils ne produisent pas d'électricité. Il s'agit d'usines de fabrication de combustible pour les centrales, de centres de gestion des déchets radioactifs ou de centres de recherche exploitant des réacteurs expérimentaux.

Qu'est-ce que l'EPR2, le réacteur en cours de développement par EDF et qui serait construit dans le cadre de ce programme ?

EDF développe actuellement une version optimisée de l'EPR, dans le cadre du projet "EPR2" ; une solution industrielle optimisée dans la perspective d'un renouvellement du parc nucléaire français.

L'EPR optimisé ou EPR2 reprend le meilleur de la technologie EPR, son niveau de sûreté parmi les plus élevés au monde, ses performances environnementales, sa puissance, etc. tout en intégrant des optimisations issues du retour d'expérience des EPR actuels, en construction ou en fonctionnement (Flamanville 3, en France, Taishan, en

Chine, Hinkley Point C en Angleterre et Olkiluoto en Finlande).

L'EPR2, comme l'EPR, est en effet un réacteur de génération 3 avec des niveaux de performances, de sûreté unanimement reconnues (il est licencié dans 4 pays dans le monde) et environnementales extrêmement élevées. L'objectif de l'EPR2 est de reprendre les atouts de l'EPR, tout en améliorant ce qui nous a posé des difficultés à Flamanville 3, c'est-à-dire faciliter la construction du réacteur pour, in fine, le construire plus vite et à un coût moindre.

Nous sommes à un niveau d'études techniques très avancé sur ce modèle EPR2, dont les principaux choix de conception ont d'ailleurs été avalisés

6- Avec 56 réacteurs en exploitation, répartis sur 18 sites nucléaires, la France dispose du parc nucléaire le plus important du monde en proportion de sa population.

7- Les équipes conçoivent tout d'abord l'EPR2 via un jumeau numérique 3D.

8- Schéma de principe d'une centrale nucléaire EPR2.

9- Une centrale EPR2 telle qu'elle s'intégrera dans le paysage.

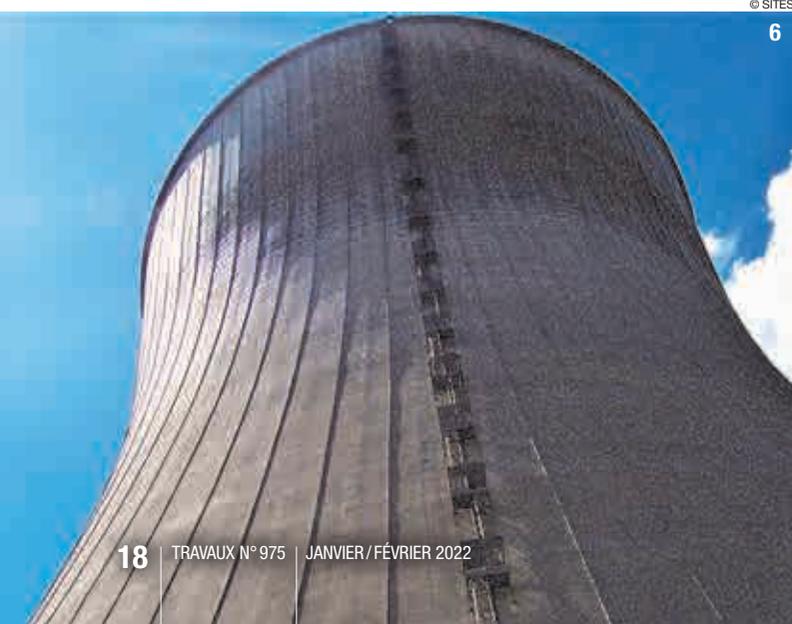
l'été dernier par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Nous disposons donc aujourd'hui d'un référentiel de sûreté stable et convergé avec l'autorité.

Comment comptez-vous parvenir à optimiser l'EPR ?

Nous avons intégré tous les retours d'expérience des EPR précédents, mais aussi du parc nucléaire en exploitation actuellement, en standardisant le plus possible le modèle, y compris en s'appuyant sur les fournisseurs, pour faciliter la construction et réduire les coûts.

Nous poursuivons ce travail technique et continuons d'embarquer la filière pour optimiser toujours plus.



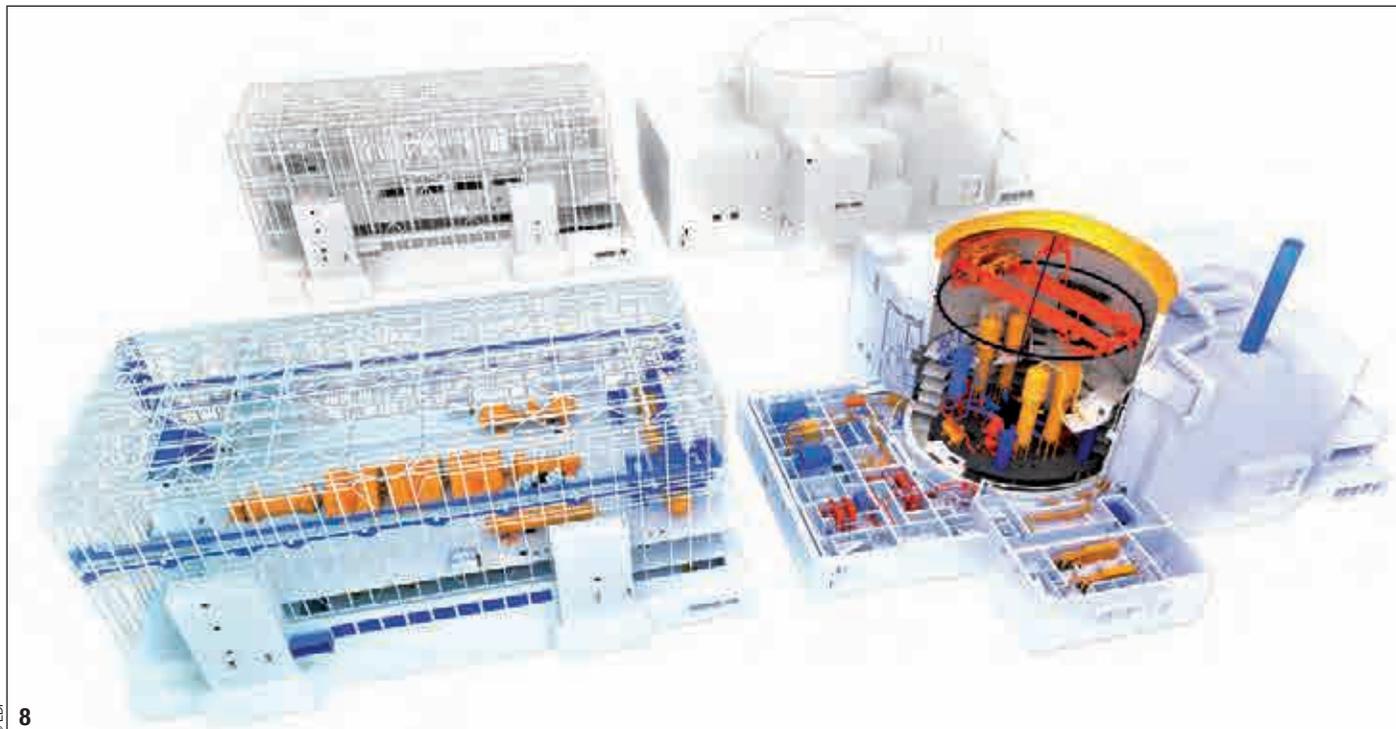
© SITES

6



© EDF

7



© EDF 8

Depuis la conception de l'EPR2, différents leviers d'optimisation ont été mis en œuvre. Grâce à la standardisation du réacteur, avec les industriels, nous allons utiliser les équipements dont ils disposent dans leur catalogue professionnel en limitant le nombre de références et en simplifiant nos spécifications.

Côté génie civil, nous avons corrigé les singularités qui figurent dans le design et qui contribuent à la complexité du chantier et à son allongement, en collaboration avec les industriels de la filière. Pendant plusieurs années, les grandes entreprises de génie civil ont été présentes directement dans nos équipes pour corriger ces singularités dans nos maquettes, mais aussi challenger nos

méthodes et planning de construction. Actuellement, nous faisons le même exercice avec les entreprises de montage.

Un énorme effort est réalisé au niveau de la transformation digitale de l'ingénierie d'EDF pour mieux maîtriser nos données, pour renforcer nos processus d'ingénierie, pour les rendre plus efficaces.

Pour atteindre cet objectif, la démarche s'appuie sur de nombreux outils digitaux, faisant d'EPR2 le premier réacteur full digital. Les équipes conçoivent tout d'abord l'EPR2 via un jumeau numérique 3D, avant de le "projeter dans le temps" grâce à la 4D. Par le biais du numérique, les ingénieurs peuvent dès aujourd'hui anticiper les étapes de

construction pour prévenir les aléas sur le chantier, partager des données fiabilisées, en temps réel, avec les partenaires industriels, et même contrôler la faisabilité des futures activités d'exploitation et de maintenance, dans les meilleures conditions. Ces innovations placent la filière nucléaire française à la pointe de la technologie.

Des évolutions ont également été menées dans la filière industrielle pour tirer tout le retour d'expérience de Flamanville 3 et disposer d'une filière en ordre de marche pour attaquer ce programme de trois paires de réacteurs. Il faut savoir qu'au moment où le chantier de Flamanville 3 a démarré, nous avons perdu en compétences car, en fait, cela faisait pratiquement 20 ans

qu'on n'avait pas démarré de chantier nucléaire en France, et c'est vrai qu'il y a eu une phase de réappropriation de la construction de ces chantiers nucléaires. Le dernier réacteur construit en France était celui de Civaux 2, dans la Vienne, et sa mise en service s'est effectuée en 1999, soit plus de dix ans avant le début du chantier de Flamanville 3. Entre le génie civil de Civaux 2 et celui de Flamanville 3, il y a eu plus de 20 ans.

Après la mise en service de Civaux 2 et sans perspective de grande construction, les compétences de la filière se sont étiolées. La principale difficulté du chantier de Flamanville tient au fait que la filière industrielle avait perdu la pratique d'un chantier d'une telle ampleur. ▷

© EDF

9





10 © BOUVIGUES-TP

- 10- Principe d'une centrale Nuward de type SMR.
- 11- Le stand Nuward au 4^e. World Nuclear Exhibition de Paris-Villepinte en novembre/décembre 2021.
- 12- La centrale de Flamanville 3.
- 13- Schéma de la cuve du réacteur d'une centrale Nuward de type SMR.
- 14- Protection incendie sur le chantier de l'EPR de Flamanville.
- 15- Conception et pose de structures mécano-soudées pour soutenir le réacteur Tokamak d'Iter.

Il a fallu tout redémarrer, ce qui a été laborieux, mais Flamanville 3 nous a aussi permis de reconstruire beaucoup de compétences, qui vont aujourd'hui être très utiles dans le cadre d'un programme de construction de trois paires d'EPR2.

C'est aussi la raison pour laquelle il est nécessaire d'engager rapidement la construction des EPR2 en France, de donner de la perspective, afin que la filière aujourd'hui remise en ordre de marche ne perde pas à nouveau les compétences qu'elle vient de retrouver grâce au chantier de Flamanville 3.

Après le rapport de Jean-Martin Folz publié en octobre 2019 sur "La construction de l'EPR de Flamanville", avec une analyse sans concession des difficultés rencontrées sur le projet, Jean-Bernard Lévy, le p-dg d'EDF a

présenté le 13 décembre 2019 le plan "Excell", afin de « créer les conditions d'un regain de confiance dans la filière nucléaire française, d'atteindre le plus haut niveau de rigueur, de qualité et d'excellence et dont l'objectif est aussi de permettre au nucléaire, énergie neutre en carbone, de continuer de jouer pleinement son rôle dans la lutte contre le changement climatique. »

Le plan d'action est axé sur trois thèmes principaux : la qualité industrielle, les compétences et la gouvernance des grands projets.

Quelles sont les technologies nucléaires actuellement proposées par EDF ?

EDF a développé une offre de réacteurs nucléaires de différentes tailles pour répondre aux besoins spécifiques des

pays et des réseaux électriques dans le monde.

La première technologie, déjà en service avec plusieurs chantiers en cours est celle de la gamme EPR.

L'EPR (European Pressurized Reactor) est un réacteur à eau pressurisée de 1 600 MW. Il a été développé pour être encore plus sûr et plus respectueux de l'environnement que les précédents réacteurs.

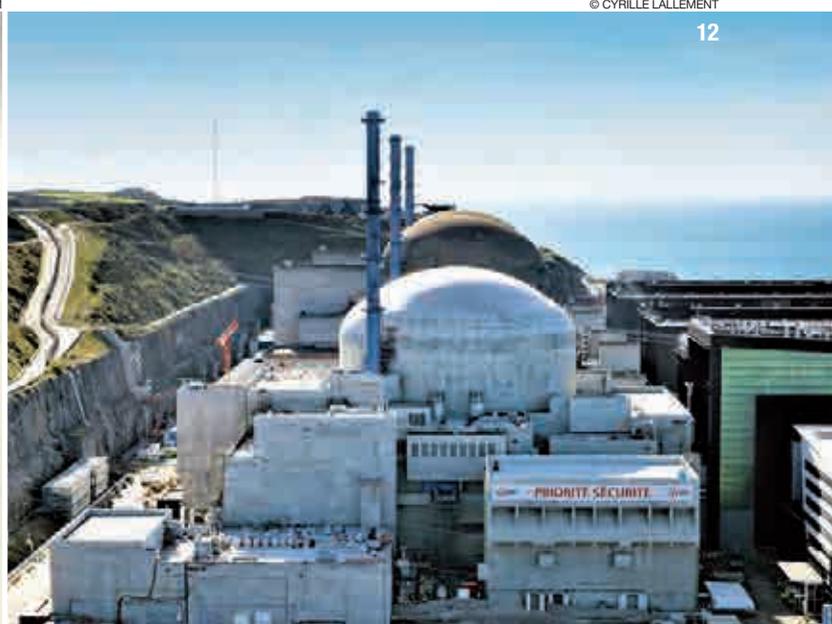
L'EPR intègre tous les progrès récents en matière de sûreté, de réduction d'impact environnemental et de performance technique. À production électrique équivalente, il permet une utilisation plus efficace du combustible (-17 % de consommation de combustible par rapport aux réacteurs de 1 300 MW) et une production de déchets radioactifs réduite de 30 %.

À l'exportation, c'est la technologie EPR que nous proposons également, en particulier aux pays en forte croissance, qui vont avoir besoin d'un volume important d'électricité. En effet, l'EPR est un réacteur de grande puissance : 1 650 MW. Il est adapté à des réseaux électriques solides dans des pays qui visent à limiter la consommation de foncier.

EDF développe également l'EPR1200, un EPR de moyenne puissance (1200 MW), destiné aux pays aux contraintes de réseaux ou de source froide ne leur permettant pas d'accueillir des réacteurs de forte puissance ou qui souhaitent intégrer dans leur mix électrique de la production nucléaire tout en ayant des besoins électriques plus modestes. Ce modèle est par exemple destiné à l'appel d'offres émis actuellement par la République Tchèque.



© AGENCE MIMRAM



© CYRILLE LALLEMENT

Enfin, EDF et ses partenaires, au sein de Nuward, conçoivent actuellement un modèle de SMR (Small Modular Reactor) qui, à terme, serait une réponse adaptée pour des offres export dans des pays au réseau électrique limité, par exemple pour remplacer des centrales charbon de 300-400 MWe. EDF vise le lancement de la construction d'une centrale de référence en France à l'horizon 2030.

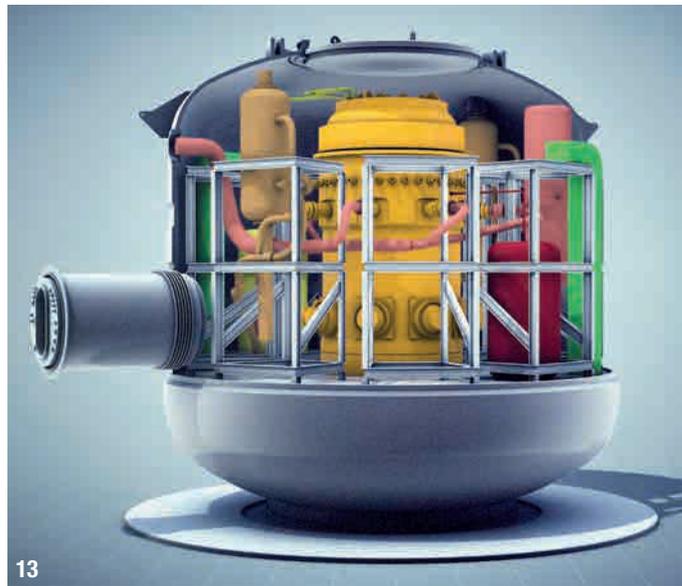
Faisons un focus sur les SMR. En les intégrant dans le plan d'investissement France 2030, le président de la République a montré sa volonté de faire émerger en France, d'ici 2030, ces réacteurs nucléaires de petite taille et innovants.

Qu'en est-il de ces réacteurs ?

Le Small Modular Reactor (ou SMR) a vocation à répondre à un marché en éclosion qui se concrétisera dans la décennie 2030 puisque nombre de pays émergents devront fermer leurs plus anciennes centrales à charbon ou fioul, afin de répondre aux objectifs de neutralité carbone.

Conçus pour être fabriqués en usine de façon modulaire et standardisée, les SMR sont rapidement installables sur site. Ils constituent un atout dans la décarbonation du mix énergétique mondial ainsi qu'une solution industrielle durable et flexible pour répondre aux enjeux de pays isolés, avec un réseau électrique limité ou fortement dépendants d'une production énergétique fossile.

EDF, via le consortium français Nuward réunissant EDF, le CEA, TechnicAtome et Naval Group, a pour ambition de proposer à l'export un produit simple, sûr, performant et compétitif dans un segment de petite puissance afin de



13 © BOUYGUES-TP

répondre à la demande du marché dans la prochaine décennie, et ce en complément de son offre de réacteurs de forte puissance.

Aujourd'hui, l'avant-projet sommaire de Nuward est terminé. Le design général du réacteur est posé et nous avons vérifié que les principales innovations technologiques envisagées sont accessibles. Nous avons fait le choix d'un design susceptible d'être mené assez vite à maturité.

Nuward serait construit par paire avec une turbine commune dans une centrale de 340 mégawatts (2x170 MW), pour viser le marché du remplacement, dans les décennies 2030 et 2040, des centrales à base de fossiles (fioul, charbon, voire gaz) dans les pays qui voudront accélérer leur décarbonation. L'idée est de garder le même site, le même réseau électrique, le même accès à une rivière ou à la mer - indispensable pour le refroidissement d'une

chaudière nucléaire - pour y "plugger" (connecter) facilement un SMR.

Les SMR pourraient jouer un rôle essentiel dans le remplacement des centrales au charbon pour les pays encore très fortement dépendants. En effet, de nombreux pays, afin de relever le défi du changement climatique, envisagent de déclasser une quantité de centrales à charbon... notamment les plus anciennes, les plus polluantes, généralement dans une gamme de capacité de 300-400 MW, équivalente à la puissance des SMR.

Le projet Nuward bénéficie du soutien de l'État dans le cadre du plan de relance France 2030.

Pouvez-vous faire le point sur les EPR dans le monde, en service et en construction ?

Aujourd'hui, 3 réacteurs EPR sont déjà en fonctionnement dans le monde, en Chine et en Finlande.

Les deux EPR chinois ont été construits sur le site de Taishan dans le cadre d'un partenariat avec le groupe China General Nuclear Power Corporation (CGNPC), dont EDF détient 30% des parts. Le premier des deux réacteurs a été mis en service le 29 juin 2018. L'unité n°1 fournit en moyenne 1 TWh par mois sur le réseau. La mise en service commerciale de Taishan 2 a eu lieu le 7 septembre 2019. Avec ces deux réacteurs, la centrale de Taishan peut produire jusqu'à 24 TWh d'électricité par an, soit la consommation annuelle de 5 millions de Chinois.

En Finlande, le réacteur nucléaire EPR d'Olkiluoto a quant à lui "divergé", c'est-à-dire a connu sa première réaction nucléaire, tout récemment, le 20 décembre 2021. Après le démarrage du réacteur construit par le groupe français Areva, la production d'électricité débutera en janvier avec une puissance à environ 30%, avant une mise en service à pleine puissance en juin. Avec une capacité de production de 1 650 mégawatts, il doit fournir environ 15% de la consommation du pays nordique.

Du côté des EPR en construction, il y a bien-sûr Flamanville 3, qui en est au stade des dernières finitions et dont le démarrage est prévu pour fin 2022. Et les deux EPR du site d'Hinkley Point au Royaume Uni, en phase de construction du génie-civil.

EDF a-t-elle d'autres projets à l'export ?

EDF est très présente dans des projets de vente à l'export.

Du côté de la Grande-Bretagne, nous menons l'étude de deux nouveaux EPR à Sizewell dans le Suffolk. Avec les deux EPR en cours de construction à Hinkley Point, ces réacteurs britanniques ▷

© AGENCE TU VERRAS



14

© AGENCE MIMRAM



15

permettraient de fournir en électricité l'équivalent de 6 millions de foyers et d'éviter l'émission de 18 millions de tonnes de CO₂ par an.

En parallèle de cela, nous avons remis une offre engageante pour construire six EPR en Inde, au sud de Mumbai. C'est le projet Jaitapur. En effet, l'Inde prévoit de se doter d'une capacité supplémentaire de 56 GW d'ici à 2040 et EDF est en négociation avec Nuclear Power Corp of India Ltd (NPCIL), l'exploitant indien, pour la construction de ces six EPR. Notre proposition concerne les études et les équipements ; la construction et l'exploitation étant sous la responsabilité de NPCIL. Ce site deviendrait alors le plus grand site de production nucléaire au monde.

Nous avons également remis il y a quelques mois une proposition en Pologne pour construire entre quatre et six EPR, et nous nous préparons à répondre à un appel d'offre en République Tchèque.

D'autres opportunités pourraient s'ouvrir à plus long terme : récemment, les Pays-Bas, dans leur programme de coalition ont manifesté leur souhait de relancer le nucléaire, et d'autres prospects sont possibles en Europe de l'Est.

D'ailleurs, EDF était présente au 4^e World Nuclear Exhibition, qui a souligné le dynamisme de l'industrie nucléaire en ce moment.

La 4^e édition du WNE (World Nuclear Exhibition), salon mondial du nucléaire civil, qui a eu lieu pendant trois jours du 30 novembre au 2 décembre 2021 à Villepinte au nord de Paris, s'est déroulé dans un climat porteur.

L'édition 2021 a tenu ses promesses en termes d'audience. L'événement organisé par le GIFEN (Groupement

des Industriels Français de l'Énergie Nucléaire) a réuni 17 000 participants et 612 exposants (dont 40% d'internationaux) venus de 76 pays. Les chiffres 2021 reflètent une nouvelle fois l'attractivité du nucléaire. Pendant trois jours, l'industrie nucléaire mondiale réunie à Paris a su rappeler qu'elle était en mesure de relever le défi du changement climatique. Parce qu'elle est capable de produire de l'électricité bas carbone en continu et à des prix compétitifs, mais également d'innover, de s'adapter aux multiples enjeux du monde actuel en développant de nouvelles solutions, notre industrie confirme qu'elle est, comme l'affirme le thème qui a guidé le salon : "un acteur clé pour une société bas carbone et un avenir responsable".

Au cours du salon, EDF a annoncé la signature de plusieurs accords de coopération industrielle impliquant des partenaires tchèques, polonais, indiens, saoudiens et français.

Le Groupe EDF et la filière française travaillent activement à la promotion de leurs produits, de leur savoir-faire et des services associés, mettant en avant leurs compétences sur l'ensemble du cycle de vie d'un projet nucléaire, depuis l'ingénierie jusqu'à la gestion des déchets en passant par la construction, l'exploitation, la maintenance, la formation et le démantèlement.

Comment EDF se positionne-t-elle sur ce marché mondial du nucléaire ?

Sur le marché mondial du nucléaire, quelques grands pays disposent d'une filière industrielle capable de faire des offres à l'international. Dans ces pays, il y a bien-sûr la France.

En face d'elle, on trouve la Russie, dont l'industrie nucléaire est déjà très active

ON NE SAIT PAS GÉRER LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : INFO OU INTOX ?

Comme toute industrie, le nucléaire produit des déchets. Pour une partie, il s'agit de déchets "conventionnels", mais ce qui interroge les citoyens porte souvent sur la gestion des déchets radioactifs. Et sur ce sujet, rien n'est tabou. Le tout est de l'aborder avec objectivité, en toute transparence.

Pour donner un ordre de grandeur, l'électricité consommée par une personne en France pendant 50 ans représente 20 kg de déchets radioactifs. Dans ces 20 kg, 500 grammes sont des déchets dits à vie longue. L'ensemble des déchets radioactifs produits en France (par les centrales nucléaires mais aussi par le milieu médical par exemple) a une filière de traitement.

90% des déchets nucléaires produits par les centrales sont faiblement ou très faiblement radioactifs et tous ont des filières de traitement et de stockage. Le combustible usé à l'origine des déchets hautement radioactifs (ils concentrent à eux seuls 99,9% de la radioactivité) peut être recyclé à plus de 96%. Il peut notamment est transformé en combustible "MOX". Aujourd'hui, 22 réacteurs du parc français sont autorisés à utiliser ce combustible recyclé et l'EPR2 serait lui aussi apte à l'utiliser.

La partie non-recyclable du combustible est quant à elle vitrifiée et entreposée à La Hague, près de Cherbourg, et a vocation à être stockée en profondeur dans le sol : c'est l'objet du projet Cigéo, conduit par l'Andra.

à l'export. Il y a aussi la Corée du Sud qui vient de mettre des réacteurs en service dans les Émirats Arabes Unis. La Chine et les États-Unis, notamment avec le modèle AP 1000 développé par Westinghouse, disposent également d'une filière nucléaire complète en support à leurs offres internationales. Toutes ces filières industrielles s'appuient sur un marché domestique fort. C'est en particulier le cas de la Russie, de la Corée du Sud et de la Chine. C'est pourquoi le programme nucléaire français est aussi essentiel pour le succès de nos offres à l'international.

Pour conclure, comment le Groupe EDF est-il impliqué dans la filière nucléaire française ?

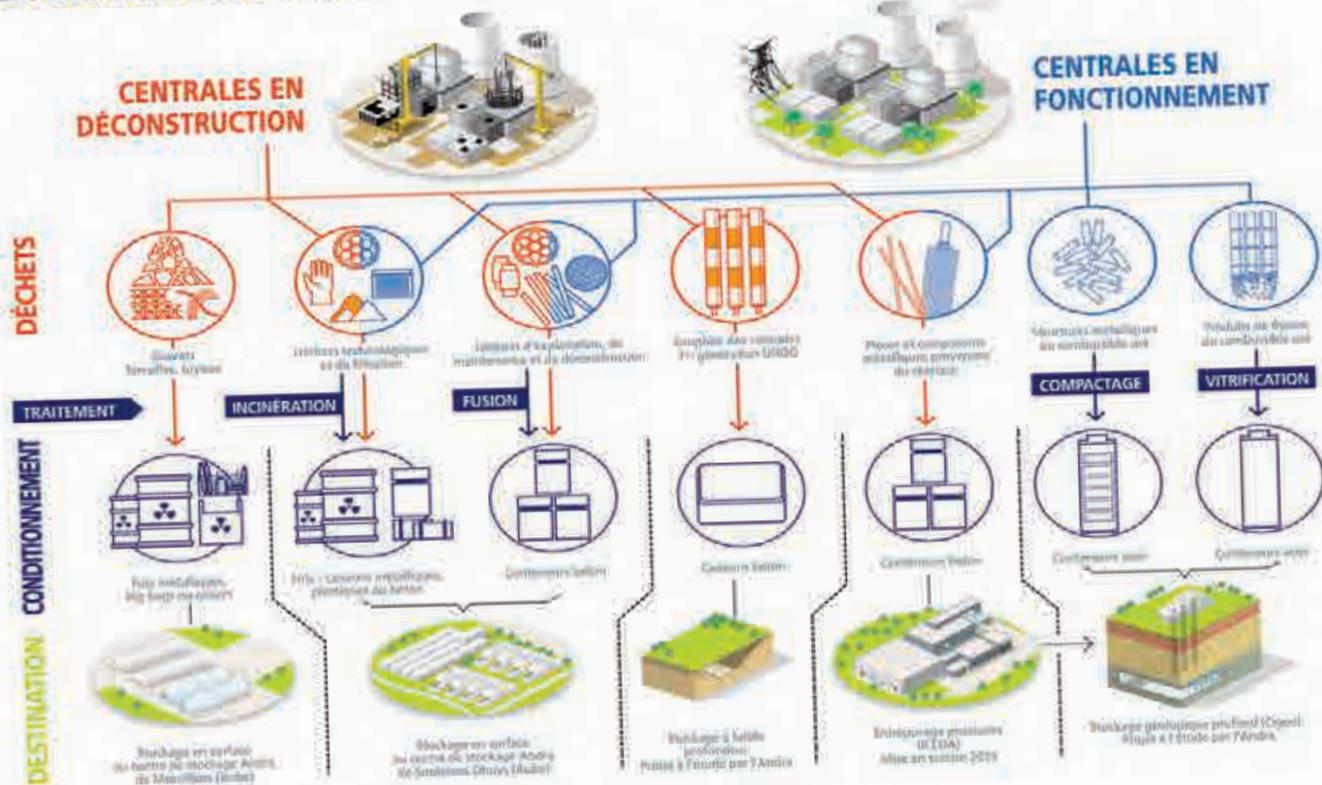
Le projet EPR2 est intimement lié à la filière nucléaire française. Nous avons beaucoup travaillé ensemble sur les retours d'expérience que nous retirons des projets EPR déjà réalisés, notamment de Flamanville 3.

Tous les partenaires ont été associés à ces retours d'expérience, ainsi qu'au développement de l'EPR2 en intervenant directement dans la conception pour prendre en compte les ensei-



© CYRILLE LALLEMENT

LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS



© BOUYGUES-TP 17

gnements tirés des premières réalisations d'EPR, en injectant leurs retours d'expérience dans nos maquettes, en standardisant au maximum les éléments constitutifs du réacteur EPR dont ils disposent en catalogue et dont ils maîtrisent parfaitement la réalisation. De notre côté, nous cherchons à leur donner un maximum de visibilité. Nous avons plusieurs appels d'offre en cours dont le but est, certes, de choisir les fournisseurs pour réaliser

- 16- Vue aérienne du centre de stockage de l'Andra dans la Manche.
- 17- Infographie sur la gestion des déchets radioactifs.
- 18- Vue aérienne du site de Meuse/Haute-Marne des futures installations de Cigéo.

le programme mais aussi beaucoup de donner de la visibilité aux entreprises de la filière, pour leur permettre d'embaucher et d'investir dans l'outil industriel. Notre objectif est que les entreprises de la filière soient prêtes à réaliser le programme et disposent d'une anticipation suffisante pour se préparer. Dans les usines de Framatome, par exemple, nous réalisons les premières fabrications.

Cette préparation passe aussi par l'obtention de toutes les autorisations administratives nécessaires ainsi que par un dialogue continu avec le territoire dont le débat public sur Penly serait une pierre angulaire. L'objectif de ces anticipations est d'être en mesure, si le gouvernement décide de lancer le programme EPR2, d'ouvrir le premier chantier à Penly en 2023 et, ensuite, de mener la construction des deux réacteurs jusqu'en 2035/2037. □

© AGENCE TU VERRAS 18



EIFPAGE ACTEUR MAJEUR DE L'ÉOLIEN OFFSHORE

La transition écologique qui s'opère depuis plusieurs années a amené le groupe Eiffage à diversifier ses marchés cibles en s'orientant notamment vers le marché en croissance des énergies renouvelables et, en particulier, celui de l'éolien offshore. Le groupe fait appel à l'expertise de ses métiers complémentaires pour se positionner sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Structure, électricité, raccordement, automatisme, mécanique, climatisation, instrumentation... son savoir-faire est complet. Tour d'horizon avec Antoine de Prémont, Directeur du département de l'éolien offshore d'Eiffage Métal. **Entretien avec Antoine de Prémont, Directeur de l'éolien offshore d'Eiffage Métal.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON

1- Antoine de Prémont, directeur de l'éolien offshore d'Eiffage Métal.



Quelles sont les origines du département éolien offshore d'Eiffage Métal ?

L'origine remonte aux années 70 puisque, dès cette époque, Eiffage Métal a été impliquée dans de nombreux projets pétroliers ou parapétroliers - Oil & Gas - avec son yard historique de Fos-sur-Mer, en France et à l'export ce qui lui a permis d'acquérir un savoir-faire important en réalisant plus de 200 projets en lien avec l'activité marine.

À partir de 2006, l'entreprise s'est intéressée aux premiers marchés d'éolien en mer - ils ont vu le jour en 2002 au Danemark - et a commencé à répondre à plusieurs appels d'offres.

En 2010, elle a fait le choix de se rapprocher de l'entreprise belgo-hollandaise Smulders en concluant un accord pour le marché français qui en était encore à ses prémices. Cette collaboration a abouti au rachat de Smulders en 2013.

L'activité offshore de Smulders concerne les pièces de transition de fondations monopieux, les jackets - structures de fondations treillis adaptées à une profondeur d'eau plus importante que les fondations monopieux - ainsi que les sous-stations électriques (postes de transformation en mer). Les fondations monopieux sont les plus compétitives sur le marché et sont aussi les plus nombreuses puisqu'elles représentent

FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURES 2 & 3 © EIFPAGE





4

© RAY PRITCHARD/EIFFAGE

2- La structure "topside" de 3400 t de la sous-station de Saint-Brieuc en cours de transfert.

3- Dans l'usine d'Hoboken, installation des transformateurs pour le projet de Saint-Brieuc.

4- Les jackets de fondation pour le parc éolien offshore de Béatrice au large de la côte de Caithness dans les highlands du nord de l'Écosse.

5- Jackets en fabrication à Newcastle-upon-Tyne pour le parc éolien offshore Béatrice en Écosse.

6- Transport des structures de fondations pour le parc éolien offshore de Moray-Ouest au large de l'Écosse.

ANTOINE DE PRÉMONT : PARCOURS

Antoine de Prémont est ingénieur de l'École Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie (ESTP 2011).

Il intègre Eiffage Métal en 2011, au département chiffrage, pour répondre notamment à l'appel d'offres du parc éolien de Saint-Nazaire.

En 2012, il rejoint Smulders, en Belgique et aux Pays-Bas où il occupe la fonction d'assistant chef de projet, responsable contractuel, responsable de suivi de coûts pour différents projets offshore, en particulier le Dan Tysk (80 pièces de transition et monopieux) en 2012 puis, en 2013 et 2014, les projets Amrun Bank (80 fondations), Humber Gateway (57 fondations), Q10 Luchterduinen (43 fondations) et Gemini (150 fondations).

En 2015, il regagne la France pour assurer notamment le suivi des appels d'offres relatifs aux projets éoliens marins : Saint-Brieuc et Saint-Nazaire pour parvenir à une attribution de marchés en 2019.

En 2017, il suit le programme de négociation de la Harvard Law School de Cambridge.

Entre 2018 et 2020, il passe directeur des énergies marines renouvelables d'Eiffage Métal.

Depuis octobre 2020, Antoine de Prémont est directeur opérationnel adjoint d'Eiffage Métal et directeur du département de l'éolien offshore d'Eiffage Métal pour la France et pour l'Europe.

de l'ordre de 70 % du volume de fondations installées en Europe.

Actuellement, le périmètre offshore de Smulders représente environ 400 M€ de chiffre d'affaires annuel, soit 80 % de son activité, l'entreprise réalisant par ailleurs essentiellement des ouvrages d'art.

Le marché des éoliennes en mer est un marché de capacités. Il concerne des projets qui suivent un processus assez cadré d'autorisations. Lorsque ces dernières sont données, il importe de construire et d'exploiter au plus vite la durée de concession qui est fixe, généralement de l'ordre de 25 à 30 ans. Les monopieux, plus compétitifs en termes de prix, sont aussi les plus rapides à construire. La capacité de Smulders est de pouvoir fabriquer à la chaîne entre 3 et 5 unités par semaine, ce qui lui permet d'être réactive au niveau du planning.

Sur les vingt dernières années, Smulders a ainsi produit plus de 2 000 pièces de transition venant coiffer les fondations monopieu. ▶

© RAY PRITCHARD/EIFFAGE

5



© EIFFAGE

6



Il s'est d'ailleurs produit une accélération sur ce marché : les 1 000 premières ont été fabriquées entre 2002 et 2015, les 1 000 suivantes au cours des 5 dernières années.

Une évolution s'est également produite au niveau des tailles : les premières fondations étaient quasiment 5 fois plus légères et moins volumineuses que celles que l'on installe aujourd'hui. Les cylindres formant les pièces de transition ont aujourd'hui des diamètres de 7 mètres pour une hauteur de 25 mètres, ce qui correspond à un poids de 400 tonnes alors que, le premier projet Horns Rev 1 en 2002 au Danemark faisait appel à des pièces de transition de 70 tonnes et d'une hauteur de 20 mètres.

Quelles sont les expertises portées par les autres métiers du Groupe ?

Eiffage Energie Systèmes, à travers son entité Clemessy, assure des prestations d'électronique et de raccordement au réseau électrique comme c'est le cas sur le projet du parc éolien offshore de Saint-Nazaire.

Elle a ainsi en charge l'assemblage et les tests des modules de puissance installés au cœur des mâts des éoliennes. Les 80 blocs électroniques vont convertir l'électricité produite pour la faire converger vers la sous-station offshore. Les premiers assemblages ont eu lieu en mars 2021 et devraient s'achever en juin 2022.

Elle a également réalisé le marché de conception-construction du poste haute tension de Prinquiau, destiné à raccorder l'énergie produite par les éoliennes au réseau public de transport de l'électricité.

Sur ce même projet, l'entité spécialisée Eiffage Travaux Maritimes et Fluviaux

EMDT/EMYN

- **La société Éoliennes en Mer Dieppe Le Tréport (EMDT) a remporté en juin 2014 l'appel d'offres lancé par l'État pour le développement d'un parc éolien en mer au large de Dieppe et du Tréport. La mise en service est prévue à l'horizon 2024.**
- **62 éoliennes fabriquées par Siemens Gamesa Renewable Energy.**
- **Puissance de chaque éolienne : 8 MW.**
- **Puissance totale du parc : 496 MW.**
- **Production annuelle : 2 000 GWh/an soit l'équivalent de la consommation annuelle de 850 000 personnes.**
- **Surface de la zone de l'appel d'offres : 110 km².**
- **Distance entre chaque éolienne : 1 100 à 1 300 mètres.**
- **Parc situé à 15,5 km du Tréport et à 17 km de Dieppe.**
- **La société Éoliennes en Mer Îles d'Yeu et de Noirmoutier (EMYN) a remporté en juin 2014 l'appel d'offres lancé par l'État pour le développement d'un parc éolien en mer au large des îles d'Yeu et de Noirmoutier. La mise en service est prévue à l'horizon 2025.**
- **62 éoliennes fabriquées par Siemens Gamesa Renewable Energy.**
- **Puissance de chaque éolienne : 8 MW.**
- **Puissance totale du parc : 496 MW.**
- **Production annuelle : 1 900 GWh/an soit l'équivalent de la consommation annuelle de 800 000 personnes.**
- **Surface de la zone de l'appel d'offres : 83 km².**
- **Distance entre chaque éolienne : 1 000 à 1 600 m.**
- **Parc situé à 11,7 km de l'Île d'Yeu et à 16,5 km de Noirmoutier.**

a participé à la réalisation de la liaison double de 61 km pour le raccordement par câbles du parc éolien au poste de Prinquiau. Dans ce cadre, les équipes sont intervenues pour l'atterrage des câbles sur la plage de la Courance ainsi que pour l'installation d'une partie de la liaison souterraine à deux circuits de 225 000 volts sur 13,5 kilomètres passant par les communes de Saint-Nazaire, Trignac et Montoir-de-Bretagne

et comprenant la pose de 54 kilomètres de fibre optique. Ces travaux ont été menés entre septembre 2019 et juin 2021.

Concernant plus spécifiquement votre entité, quelle est l'organisation mise en place en France et à l'international ?

En France, le département offshore d'Eiffage Métal dispose d'une équipe

basée au siège de l'entreprise à Vélizy-Villacoublay et d'une équipe à Fos-sur-Mer où se situe le yard de construction historique, actif depuis les années 73/74, aujourd'hui reconverti à l'éolien flottant.

À l'étranger, nous disposons de trois usines principales : à Hoboken en Belgique, Zary en Pologne et Newcastle-upon-Tyne en Angleterre.

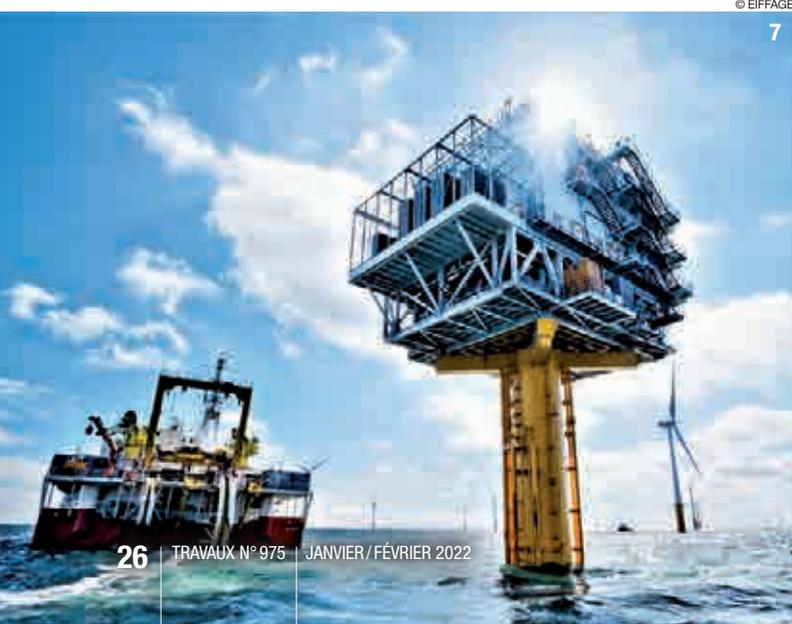
Le site de Hoboken couvre 130 000 m² et dispose de 2 halls de production d'une surface totale de 27 000 m². Grâce à un pontique de forte capacité, il est capable de lever des pièces jusqu'à 560 tonnes. L'usine de Zary assure la fabrication des éléments secondaires installés sur les fondations. Quant au site de Newcastle-upon-Tyne, il est plutôt dédié à la fabrication des jackets. Dans le futur, compte tenu de l'évolution du marché, Newcastle pourrait réaliser des pièces de transition pour les fondations monopieu ou encore des flotteurs d'éoliennes en mer. Il faut noter que l'ensemble de cette chaîne est bâti sur une logique de production en série. C'est cette chaîne qui fait vraiment la valeur ajoutée de notre savoir-faire : maîtriser la totalité des points de cette chaîne de production en série pour atteindre les capacités que j'ai mentionnées précédemment de 3 à 5 par semaine.

Quels sont les projets déjà réalisés et sur quels sites ?

En Europe, nous avons réalisé plus de 30 sous-stations, 2 000 pièces de transition et 200 jackets.

En France, nous assurons actuellement la fabrication des fondations - monopieux et pièces de transition - du projet de Saint-Nazaire.

Le contrat pour la construction de 80 fondations en acier a été attribué



en 2019 au consortium Eiffage (ingénierie, production) et DEME (installation). Et ceci pour le "contrat clé en main" ou contrat EPCI : ingénierie, approvisionnement, construction et installation des monopieux et pièces de transition.

Le projet de Saint-Nazaire se compose de 80 éoliennes en mer de type Haliade 150 d'une capacité individuelle de 6 MW pour une puissance totale de 480 MW. Les éoliennes sont localisées entre 12 et 20 km au large de la Loire-Atlantique, sur une surface globale de 78 km², à une profondeur variant entre 12 et 25 mètres.

Les 80 fondations monopieux en acier mesurent pour certaines plus de 60 mètres de hauteur et leurs pièces

7- La sous-station du parc éolien de Belwind au large d'Ostende.

8- Sous-station pour le parc éolien offshore de SeaMade en mer du Nord belge.

9- Les pièces de transition des fondations monopieux du parc de Saint-Nazaire mesurent plus de 20 m de hauteur.

10- Eiffage réalise la fabrication des 80 fondations du projet de Saint-Nazaire.

11- Chargement avant transfert des pièces de transition du projet de Saint-Nazaire.



© EIFFAGE
9

de transition plus d'une vingtaine de mètres de hauteur. En moyenne 3 pièces par semaine ont été fabriquées dans l'usine de Hoboken. Le contrat inclut également le soudage, l'assemblage de la plateforme interne, les traitements, la peinture et l'équipement électrique. DEME a en charge l'installation des monopieux dont les premières ont eu lieu au printemps 2021 et s'achèveront au cours de l'été 2022.

Un autre projet en cours d'exécution est la sous-station du projet de Saint-Brieuc. Sa fabrication est quasiment terminée et son installation est prévue au printemps 2022 sur le champ éolien.

La sous-station offshore de Saint-Brieuc est composée d'un jacket de 63 mètres de haut pesant 1 630 tonnes et de pieux de 315 tonnes, ainsi que d'une structure topside de 3 400 tonnes :

le topside mesure 55 mètres de longueur, 31 mètres de largeur et 23 mètres de hauteur⁽¹⁾.

Elle sera au centre du futur parc éolien en mer de Saint-Brieuc et ses 62 éoliennes : tous les câbles y seront connectés, elle transformera la matière première en électricité et la fournira à RTE pour être injectée dans le réseau électrique.

Eiffage Métal, au travers de sa filiale Smulders Métal, est responsable de l'ingénierie et de la construction des structures en acier du jacket et du topside. Tous les travaux sont réalisés en interne, dans les installations de production de Smulders en Belgique et en Pologne. Le topside a été transféré sur le chantier d'Engie Solutions à Hoboken pour l'assemblage final. Les travaux d'assemblage du jacket ont eu lieu sur le chantier de Smulders à Vlissingen (Pays-Bas).

Les techniques d'installation en mer de ces équipements dépendent des conditions de sol : il s'agit soit de battage, soit de forage pour les pieux ou les monopieux à partir de plateformes autoélévatrices.

Le groupe Eiffage est-il impliqué dans les projets éoliens flottants français ?

Nous participons à deux projets en cours dans le cadre des quatre fermes pilotes lancés en France en 2016. Les deux projets portent sur trois flotteurs chacun qui seront livrés entre 2022 et 2023.

Ces projets portés par l'ADEME pour le développement de fermes pilotes éoliennes flottantes ont pour objectif de démontrer la viabilité des technologies et d'acquies un retour d'expérience environnemental et technique pour de futurs parcs commerciaux. ▶

© EIFFAGE

10



© EIFFAGE

11



Le premier est le champ "Provence Grand Large" qui sera composé de trois éoliennes de 8,4 MW chacune (25 MW de puissance cumulée), installées sur la zone dite de "Faraman", à 17 km au large de la plage Napoléon située sur la commune de Port-Saint-Louis-du-Rhône.

Les éoliennes reposent sur un système innovant d'embases flottantes reliées à des lignes tendues fixées sur le fond marin. Sur ce projet développé par EDF Renouvelables, la société SBM Offshore est en charge de la conception et de la mise en œuvre du flotteur. Nous réalisons l'assemblage des flotteurs sur notre yard de Fos-sur-Mer.

Le deuxième projet sur lequel nous sommes impliqués est celui des éoliennes flottantes du "Golfe du Lion" (EGL) au large de Leucate et du Barcarès.

Nous sommes contractants "clés en main" pour les flotteurs. Pour ce contrat EPCI, nous concevons les flotteurs avec un partenaire, nous les fabriquons et les assemblons à Fos-sur-Mer et réalisons l'installation en mer.

Il s'agit du concept de plateforme semi-submersible faisant appel à des chaînes d'ancrage conventionnelles ancrées dans le fond marin.

Quelles sont les dernières innovations dans ce domaine ?

Les technologies d'éolien flottant sont émergentes avec des projets pilotes de trois unités par champ comme nous venons de l'évoquer. L'objectif est de tester les différentes technologies qui existent sur le marché.

Aujourd'hui, nous avons recours aux plateformes "tendues" et aux plateformes semi-submersibles, qui sont dans la plupart des cas développées en acier, mais il en existe également en



12

© EIFFAGE

béton. Une cinquantaine de concepts, étudiés par des bureaux d'études ou des industriels, proposent des solutions pour supporter des éoliennes avec des flotteurs en béton, en acier, avec des structures mixtes. Il y aura peut-être un ou deux, voire trois concepts qui s'imposeront à l'avenir.

Certains concepts sont plus ou moins valables en fonction de la nature des vagues, de la nature du sol et des conditions de site.

Dans ce cadre, Eiffage Génie Civil Marine développe un concept de flot-

teur en béton pour répondre aux appels d'offres à venir. À cette fin, nous avons conclu avec Marea Engineering and Consulting un partenariat de co-développement et de commercialisation mondiale des flotteurs XCF (flotteur en béton en forme de X compatible avec toute turbine à axe horizontal).

Grâce à notre expertise interne unique et à notre positionnement historique comme entrepreneur EPCI dans le développement d'infrastructures portuaires, de structures marines Oil & Gas, de structures en béton flottantes

et immergées, nous maîtrisons toutes les phases de construction onshore et les opérations de remorquage et d'installation offshore.

Nos services sont guidés par des objectifs de projet, intégrant les exigences de construction et d'installation issues d'études conceptuelles.

L'objectif est simple : fournir la solution EPCI la plus robuste et la plus économique pour les fondations FOW (Floating Offshore Wind) à grande échelle. Nous sommes en bonne voie pour atteindre cet objectif.

Quels sont les projets à venir ?

En 2014, l'État a attribué au concessionnaire Les Eoliennes en Mer⁽²⁾ ainsi que les champs éoliens offshore du Tréport et de Noirmoutier dont les travaux devraient être respectivement réalisés en 2024 et 2025.

C'est sur ces projets, dont les appels d'offres arrivent à leur terme, que nous travaillons actuellement, à la fois pour les sous-stations électriques et pour les fondations.

D'autres projets sont en préparation, voire en cours de lancement pour des parcs éoliens en mer au large de Dunkerque dans le Nord, au large de la Normandie, de la Bretagne ou en Méditerranée.

En France, l'État, dans sa programmation pluriannuelle de l'énergie, a évoqué l'idée du rythme d'un projet éolien marin tous les ans.

Ce que l'on constate, c'est une réelle accélération sur le marché mondial, autrefois essentiellement européen, avec l'entrée en jeu des États-Unis, de Taïwan, du Japon et de la Corée du Sud.

Ceci est à rapprocher du savoir-faire des entreprises et de leurs capacités industrielles pour respecter les délais



13

© EIFFAGE



14

© IEMANTS FABRICOM

nécessaires pour répondre avec succès aux impératifs des projets.

Le Royaume-Uni a un plan de développement de 30 gigawatts pour 2030, ce qui est ambitieux, mais de nombreuses zones ont déjà été identifiées. Compte tenu de l'augmentation de puissance des éoliennes - désormais

12- Le site de Newcastle-upon-Tyne au Royaume Uni.

13- La station haute tension offshore du parc éolien Norther au large de Zeebruges construite sur le site d'Hoboken.

14- Une sous-station de 1 200 t pour le parc éolien offshore Burbo 2 de Dong Energy en mer d'Irlande, fabriquée par Smulders sur le chantier Engie Fabricom à Hoboken.

15- Newcastle-upon-Tyne (Royaume-Uni) assure la production et l'assemblage des jackets de fondation et des pièces de transition.

16- La sous-station offshore du parc éolien de Hohe See dans la mer du Nord allemande.

17- Fabrication des pièces de fondations des éoliennes pour le parc de Saint-Nazaire dans l'usine Smulders de Hoboken.



© EIFFAGE
15

EIFFAGE MÉTAL EN BREF

- 2 500 personnes.
- 150 000 m² d'unités de production.
- 50 hectares d'aires de production.
- Unités de production.
- Smulders Projects à Hoboken (Belgique) : production et assemblage des fondations, sous-stations et structures offshore de grande dimension.
- Lemants à Arendonk (Belgique) : production et traitement de surface des composants primaires en acier pour fondations et sous-stations.
- Willems à Balen (Belgique) : production et traitement de surface des composants primaires en acier pour fondations et sous-stations.
- Spomasz à Zary (Pologne) : production en série des composants secondaires pour fondations et sous-stations.
- Eiffage Metal Iberica à Madrigueras (Espagne) : production en série des mâts et composants secondaires pour éoliennes onshore.
- Smulders Projects UK à Newcastle-upon-Tyne (Royaume-Uni) : production et assemblage des jackets de fondation et des pièces de transition.
- Eiffage Métal à Fos-sur-Mer (France) : préfabrication et assemblage des flotteurs d'éoliennes en mer.
- Eiffage Métal à Lauterbourg (France) : production d'ouvrages d'art.
- Cumul des productions en 2021 : 2 000 pièces de transition pour fondations monopieu, 150 jackets de fondation, 3 000 mâts pour turbines d'éoliennes.

de 15 MW -, il faudra probablement en 2030 moins de 35 éoliennes pour réaliser un champ de 500 MW, alors que pour celui de Saint-Nazaire, il aura fallu 80 éoliennes de 6 MW pour une puissance équivalente.

Comment envisagez-vous le développement de ce marché au regard des oppositions qui peuvent se manifester dans les zones d'implantation ?

Au Danemark, on arrive au terme des 20 ans d'exploitation des premiers champs éoliens marins. Lorsqu'il est question de leur fin d'exploitation, les pêcheurs, très hostiles initialement au développement de ces champs en mer, font aujourd'hui partie de ceux qui s'opposent au démantèlement de leurs fondations. En effet, il a été constaté que les fondations des éoliennes en mer recréaient un habitat propice au développement de la faune et de la flore sous-marines. Ce qui a abouti à des zones de pêche bien plus productives pour les pêcheurs à proximité de ces champs.

Ce qu'il faut noter, c'est la compatibilité de la pêche et du développement des champs éoliens. Lorsque la concertation est bien faite, il y a tout intérêt à les développer sans que cela nuise à l'activité de la pêche. □

1- Le consortium formé par lemants (filiale de Smulders) et Engie Solutions a remporté un contrat pour la construction d'une sous-station de transformation offshore pour le parc éolien de Saint-Brieuc. Le contrat, attribué par Alles Marines, filiale d'Iberdrola, porte sur l'ingénierie, la construction, l'installation, la mise en service et les essais de la sous-station.

2- Les Eoliennes en Mer Dieppe-Tréport et Yeu-Noirmoutier (LEM), groupement constitué de Engie, EDPR (Energias de Portugal Renováveis), Sumitomo et la Banque des Territoires (Caisse des Dépôts et Consignations).

© EIFFAGE

16



© EIFFAGE

17





1

© ELOGEN

ELOGEN

HYDROGÈNE VERT :

LE MONDE DE DEMAIN

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

ELOGEN EST LE LEADER FRANÇAIS DE L'ÉLECTROLYSE PEM (MEMBRANE ÉCHANGEUSE DE PROTONS), DANS LA CONCEPTION ET L'ASSEMBLAGE D'ÉLECTROLYSEURS DESTINÉS À LA PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE VERT. ANIMÉE PAR LE GOÛT DE L'INNOVATION ET UN SAVOIR-FAIRE TECHNOLOGIQUE DE POINTE, ELOGEN PARTICIPE, EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL, À LA DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE ET DE L'ÉNERGIE. DÉCOUVERTE DE L'HYDROGÈNE VERT ET DE SON DÉVELOPPEMENT PRÉVISIBLE AVEC JEAN-BAPTISTE CHOIMET, DIRECTEUR GÉNÉRAL D'ELOGEN.

L'hydrogène vert est la clé pour décarboner de nombreux secteurs de l'industrie, dont l'industrie pétrochimique, ainsi que d'autres usages tels que le chauffage urbain et le transport, autant de secteurs qui dépendent tous traditionnellement du gaz naturel et du pétrole. L'expertise Elogen accompagne la construction des infrastructures qui permettront

d'atteindre la neutralité carbone dans ces secteurs. Ses électrolyseurs PEM sont au cœur des centrales Power-to-Gas, qui permettent de transformer le surplus d'énergie renouvelable en hydrogène vert, afin d'alimenter le réseau de gaz existant sous forme d'hydrogène ou de méthane synthétique. Elogen change les usages car l'hydrogène pourrait permettre à la fois de

1 - Électrolyseur Elogen de 700 kW.

décarboner de nombreux segments de l'économie mais également de faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans le système énergétique. « L'actualité de l'hydrogène est bouillon-

nante, remarque Jean-Baptiste Choimet. Elle fait l'objet, quasiment tous les jours, de l'annonce de partenariats ou de plans stratégiques nationaux, comme celui de France 2030, annoncé en octobre dernier par le président Macron. Cela vient nourrir les ambitions des acteurs concernés, mais aussi les attentes des utilisateurs, certains allant même jusqu'à imaginer que

l'hydrogène pourrait bientôt remplacer l'essence de nos voitures. »

« En réalité, la route pour parvenir à ce stade comporte quelques défis technologiques. Ce qui permettra à l'hydrogène de prendre sa place dans notre économie et de créer une filière compétitive, ce sont les technologies et l'innovation. C'est en ce sens qu'une entreprise comme la nôtre a un rôle primordial à jouer pour permettre à des projets compétitifs d'aboutir et, in fine, de voir l'émergence d'une économie structurée autour de l'hydrogène vert. »

DE L'EAU DU ROBINET À DE L'HYDROGÈNE PUR À 99,99%

Très schématiquement, l'hydrogène est produit par électrolyse à partir d'une molécule d'eau qui ne se catalyse pas naturellement. Il faut apporter de l'énergie pour "casser" la molécule d'eau en oxygène d'un côté, et en hydrogène de l'autre, entre deux électrodes (anode et cathode), la réaction étant bouclée par la circulation d'ions. Selon les technologies d'électrolyse, les ions vont de l'anode vers la cathode ou de la cathode vers l'anode. Pour se déplacer, ils ont besoin d'un milieu dit "électrolyte", solide ou liquide.

« Dans la technique PEM (Proton-Exchange Membrane), membrane échangeuse de protons, développée par Elogen, l'électrolyte est une membrane polymère très fine (<1 mm) perméable aux protons. Cette membrane permet la migration des ions. De l'eau est injectée au niveau de l'anode où la molécule est cassée libérant les protons. En retenant l'oxygène, la membrane permet sélectivement à ces protons de rejoindre la cathode où est produite de l'hydrogène. La réaction d'électrolyse se produit à une température de 60°C. Ces protons étant des ions hyper-



© MARC MONTAGNON 2

JEAN-BAPTISTE CHOIMET : PARCOURS

Jean-Baptiste Choimet est diplômé de l'École Polytechnique (2004) et de l'Université de Cambridge (2005).

Il débute sa carrière en 2007 chez EDF, où il a contribué au développement du projet de terminal méthanier de Dunkerque.

Il rejoint ensuite le groupe Société Générale en 2011 pour accompagner le lancement des activités de trading de gaz et d'électricité en Europe et assurer la création de son desk de trading de gaz naturel liquéfié.

Fin 2012, il intègre Technip où il occupe successivement des fonctions commerciales et de gestion de projet pour de grands projets de liquéfaction de gaz naturel, en Australie et en Russie.

En 2019, il entre dans le groupe Bouygues Construction, où il est en charge des opérations pour le déploiement de réseaux télécoms.

Jean-Baptiste Choimet est Directeur général d'Elogen depuis décembre 2020. Il a rejoint la société à la suite de son acquisition par le groupe GTT.

2- Jean-Baptiste Choimet, directeur général d'Elogen.

3- L'électrolyse : comment ça marche ?

4- Principe de l'électrolyse PEM : l'électrolyte est une membrane très fine (< 1 mm) perméable aux protons.

mobiles, et c'est l'un des avantages de notre technologie, ils permettent de produire de grandes quantités d'hydrogène par unité de surface de membrane. »

L'ensemble de l'installation (anode, cathode, membrane) constitue une cellule dont l'assemblage en série forme un "stack" qui peut contenir une centaine de cellules. L'injection d'eau est réalisée dans le stack et il en ressort un mélange d'oxygène et d'eau et un mélange d'hydrogène et d'eau.

Les stacks sont intégrés dans une unité industrielle dite "Balance Of Plant" (BOP) et forment un électrolyseur. Le BOP contient les composants nécessaires pour fournir la puissance électrique au stack (courant continu), une unité de purification d'eau, ainsi que des appareils sous pression dans lesquels sont séparés l'essentiel de l'oxygène de l'eau et l'essentiel de l'hydrogène de l'eau. Dans l'immédiat, l'oxygène est envoyé dans l'atmosphère.

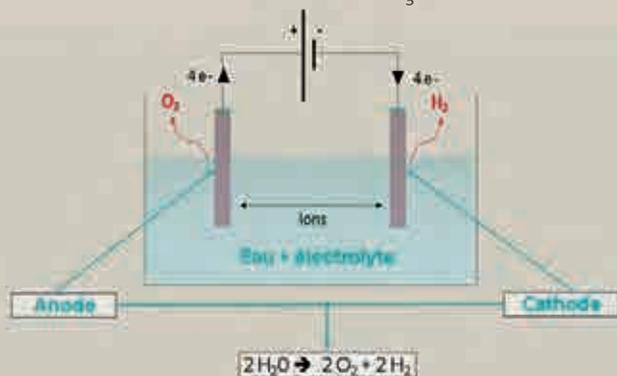
À la sortie de ces appareils, l'hydrogène est pur à minimum 99,9% et disponible à une pression de l'ordre de 30 bars. S'il doit être utilisé dans des piles à combustible, par exemple, pour alimenter des camions ou des autobus, une dernière étape de séchage permet de porter sa pureté à 99,999%.

« Pour livrer une telle machine à ses clients, précise Jean-Baptiste Choimet, Elogen met en œuvre une chaîne de compétences allant du design intégral à la construction de l'électrolyseur en passant par le développement du logiciel de programmation, le génie électrique, le modèle 3D, le couplage avec le réseau électrique. »

Ingénieurs, designers, programmeurs participent à la totalité de la conception des électrolyseurs et de la construction des stacks dans l'unité de production des Ulis (Essonne), qui abrite également le siège social de l'entreprise.

Elogen spécifie et achète ainsi l'ensemble des composants qui participent à la construction des BOP. Ensuite, elle confie à des spécialistes de la tuyauterie et des structures métalliques l'assemblage proprement dit des BOP, permettant ainsi de fabriquer des usines compactes de production d'hydrogène au plus près de ses clients et de répondre à la demande croissante. ▶

L'ÉLECTROLYSE : COMMENT ÇA MARCHE ?



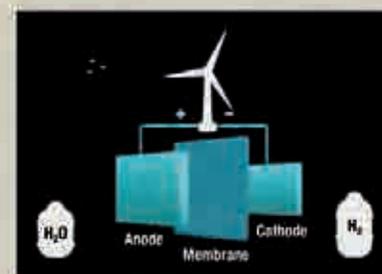
3

© ELOGEN

L'ÉLECTROLYSE PEM

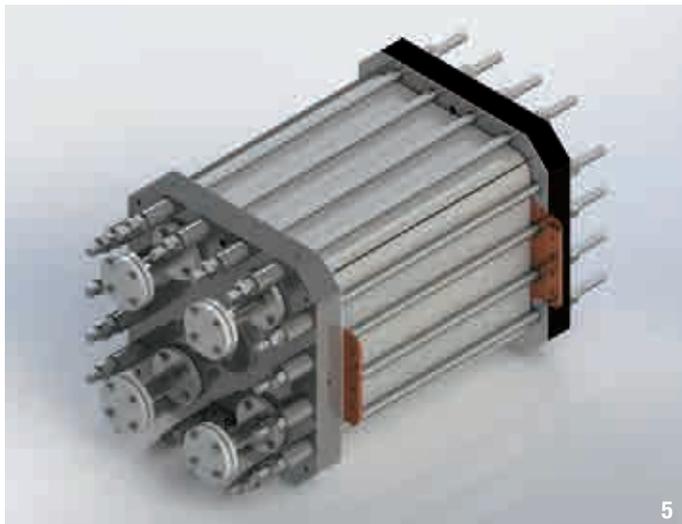
Principe :

- Dans la cellule d'électrolyse PEM, un courant continu est utilisé pour séparer les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène gazeux.
- La réaction dite "d'électrolyse" se produit à une température quasi-ambiante.
- L'électrolyte est une membrane très fine (<1 mm) perméable aux protons.

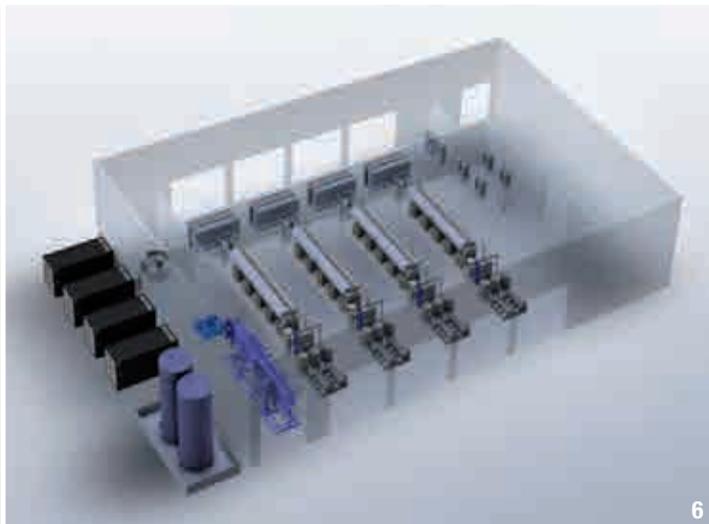


4

© ELOGEN



5
© ELOGEN



6
© ELOGEN

L'une des particularités de la technologie PEM est d'avoir démarré dans les années 1950, non pas dans un contexte industriel mais plutôt dans celui, extrêmement exigeant, des missions spatiales américaines Apollo, qui ont été les premières à utiliser des piles à combustible fonctionnant à l'aide de membranes échangeuses de cations.

Les années 1960 ont vu la première utilisation des membranes échangeuses pour l'électrolyse de l'eau et les années 1980 les premières utilisations du PEM dans les sous-marins nucléaires américains, pour produire de l'oxygène. Et le premier stack PEM français est apparu en 1989.

Quant à la filière industrielle PEM, elle se développe depuis 2000 environ tandis que CETH (aujourd'hui Elogen), s'est lancé dans l'électrolyse PEM dès 2003.

« L'un des avantages de cette technologie PEM, précise le directeur général d'Elogen, réside dans l'utilisation de protons extrêmement mobiles qui permet de faire passer une quantité importante d'électricité au travers de la membrane. À ceci s'ajoute sa simplicité d'installation mais surtout la compacité des stacks qui peuvent produire plus d'hydrogène par unité de surface que les deux autres techniques alcaline et SOEC (haute température). » (voir encadré).

Elogen est ainsi capable de développer, produire et distribuer des électrolyseurs conteneurisés, ou livrés sur châssis, clé-en-main, entièrement intégrés, pour la production d'hydrogène vert.

Les systèmes d'électrolyse haute puissance (plusieurs dizaines, voire centaines, de MW) d'Elogen seront

extensibles de manière modulaire et à volonté. Ils permettront une production à grande échelle d'hydrogène vert, pour un avenir respectueux du climat. Dès aujourd'hui, leur conception met l'accent sur un fonctionnement sûr, simple et nécessitant peu d'entretien, sans manipulation de substances dangereuses.

Plusieurs projets sont en cours, tirant pleinement partie des avantages de la technologie PEM : alimentation de flottes d'autobus urbains avec une implantation des électrolyseurs dans des espaces où les mètres carrés disponibles sont limités, mise en œuvre sur un site industriel qui utilise déjà de l'hydrogène et où les mètres carrés sont réduits, réflexions sur la mise en

5- Un " stack " Elogen.

6- Concept d'électrolyseur de grande capacité Elogen.

7- Électrolyseur en cours d'assemblage dans l'unité de fabrication des Ulis.

pressera ensuite l'hydrogène produit, qui servira à alimenter des bus à Belfast. »

Produire une grande quantité d'hydrogène avec un outil compact est critique pour les applications d'aujourd'hui à terre et, peut-être, pour celles de demain en mer.

HyPSTER : À L'INTERFACE DES PROBLÉMATIQUES

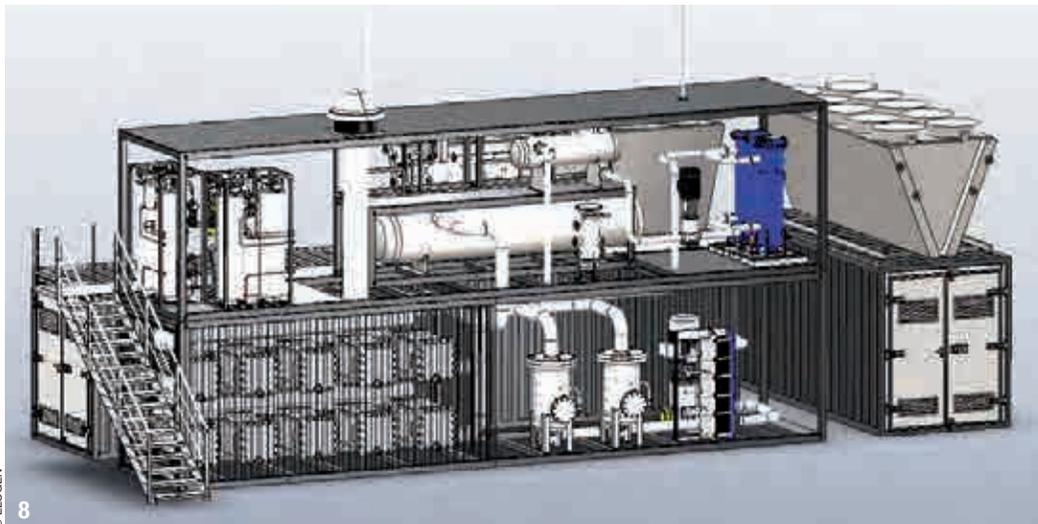
Dans ce contexte, le projet HyPSTER⁽¹⁾, qu'Elogen a remporté en octobre 2021, constitue un cas intéressant car il se situe à l'interface entre les problématiques de technologie et la mise en place d'infrastructures de transport et de stockage associées : stocker de l'hy-

drogène en mer sur des plateformes offshore où chaque mètre carré compte.

« En Irlande du Nord, nous travaillons avec le producteur d'électricité Energia pour connecter un électrolyseur Elogen à un parc éolien existant. Elogen com-



7
© ELOGEN



© ELOGEN 8

hydrogène vert produit à partir d'énergies renouvelables.

Développé par un consortium d'entreprises et d'instituts académiques, HyPSTER est un démonstrateur de stockage d'hydrogène vert à grande échelle, coordonné par Storengy, filiale d'Engie, l'un des leaders européens du stockage de gaz naturel.

L'entreprise est entourée de six autres partenaires aux expertises complémentaires : Ineris (France), Armines-École Polytechnique (France), Inovyn (Grande Bretagne), ESK (Allemagne), Element Energy UK (Grande Bretagne), Axelera (France).

Premier projet de stockage souterrain d'hydrogène vert en cavité saline soutenu par l'Union Européenne, il per-

8- Principe d'un électrolyseur "Open Power".

9- Vue partielle d'une unité industrielle dite "Balance Of Plant".

mettra de mieux évaluer la place du stockage dans la chaîne de valeur de l'hydrogène.

Storengy va commencer l'expérimentation de stockage d'hydrogène en lieu et place du gaz naturel en cavité saline sur le site d'Etrez, dans l'Ain, en s'appuyant sur des énergies renouvelables locales (photovoltaïque, hydraulique) pour la production d'hydrogène vert. En termes

de capacité, Etrez est le premier site français de stockage de gaz naturel en cavités salines.

Le territoire d'implantation du site est particulièrement dynamique pour l'essor des usages de l'hydrogène vert grâce à des projets d'envergure comme la Zéro Emission Valley (Projet ZEV) dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, la construction d'unités de production et de stations de distribution d'hydrogène dans la région Bourgogne-Franche-Comté ou encore la vallée de la chimie avec la présence de nombreux industriels.

L'installation fournie par Elogen permettra la production de 400 kg d'hydrogène vert par jour. Cette production permettra de tester le stockage d'hydrogène vert

à hauteur de 2 à 3 tonnes/jour dans un premier temps, jusqu'à l'utilisation de la capacité totale de la cavité saline identifiée, soit 44 tonnes. L'expérimentation du stockage d'hydrogène en cavité saline et la production d'hydrogène vert démarrera en 2023.

« Ce nouveau contrat représente une étape importante pour Elogen, poursuit Jean-Baptiste Choimet, puisqu'il nous positionne sur le stockage, qui constitue un maillon stratégique de la chaîne de valeur de l'hydrogène. Le choix par Storengy de la technologie d'électrolyse développée par Elogen démontre ainsi la pertinence et la performance de la technologie à membrane pour produire de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables, et consolide notre collaboration avec cet acteur majeur du stockage de gaz naturel en Europe⁽²⁾. Le démonstrateur HyPSTER jouera un rôle clé dans l'accompagnement du développement de l'économie de l'hydrogène vert en Europe et nous sommes particulièrement fiers d'associer notre technologie innovante à ce projet d'envergure. »

Ce projet bénéficie d'un financement du Partenariat Public-Privé sur les piles à combustibles et l'hydrogène (FCH 2 JU) en vertu de l'accord de subvention n°101006751. Ce PPP a reçu le soutien du programme de recherche et d'innovation Horizon H2020 de l'Union Européenne, d'Hydrogène Europe et d'Hydrogène Europe Recherche.

ITEG : HYDROLIENNE + HYDROGÈNE

Sur l'île d'Eday en Écosse, Elogen participe au projet ITEG qui combine un convertisseur flottant d'énergie marémotrice avec un électrolyseur Elogen, ainsi qu'un système de gestion de l'énergie à terre conçu sur mesure. ITEG développera et validera une solution intégrée de production d'énergie marémotrice et d'hydrogène pour la production d'énergie propre qui sera démontrée dans les Orcades. Le projet s'attaque aux émissions de carbone liées à l'énergie dans le nord-ouest de l'Europe et aux limitations d'exportation du réseau rencontrées dans les communautés éloignées

Mené par le Centre européen des énergies marines (EMEC) aux Orcades, le projet rassemble des partenaires du Royaume-Uni, de France, de Belgique et des Pays-Bas et adoptera trois technologies à faible émission de carbone (hydrolienne, électrolyseur et système de gestion de l'énergie). ▷



© ELOGEN 9

Le coût d'une démonstration pré-commerciale pour l'énergie océanique est élevé et les investisseurs hésitent à investir tant que la technologie n'aura pas été prouvée en mer à grande échelle. ITEG s'attache à réduire ces coûts grâce au développement d'une solution intégrée de production d'hydrogène.

Cette solution associe le convertisseur d'énergie marémotrice flottant de prochaine génération d'Orbital de 2 MW, l'Orbital O2 2MW, avec un électrolyseur Elogen de 500 kW et un système de gestion de l'énergie (EMS) onshore qui seront déployés sur le site de production d'hydrogène d'EMEC sur l'île d'Eday.

L'EMS soutiendra la production d'hydrogène en acheminant tout excès d'énergie généré par la turbine Orbital O2 sur le site d'essai marémotrice Fall of Warness d'EMEC pour alimenter un électrolyseur Elogen, le premier à être déployé au Royaume-Uni.

**SmartQuart :
DE L'HYDROGÈNE PUR
À 99,999 %**

Autre succès pour l'entreprise française, en Allemagne : Elogen a été sélectionnée par l'énergéticien allemand E.ON, dans le cadre du projet SmartQuart.

Elogen fournira à E.ON un électrolyseur conteneurisé d'une puissance de 1 MW et d'une capacité de production de 200 m³ d'hydrogène par heure. L'électrolyseur sera équipé d'un transformateur et d'une unité de compression. L'intégration de ces nombreux équipements permettra à l'électrolyseur d'atteindre un niveau d'efficacité inégalé et lui permettra de produire de l'hydrogène pour de

ELOGEN EN BREF

Elogen réunit à son siège des Ulis, en Île-de-France, l'ensemble des capacités pour développer et produire ses électrolyseurs PEM.

Sur ce site sont réunis les services d'innovation, d'ingénierie (process, CAO, électricité, automatismes), de vente et d'exécution.

Le site dispose également de laboratoires équipés de bancs de tests ainsi que des appareils de caractérisations chimique et mécanique.

Il assure aussi l'assemblage des stacks au moyen d'une ligne dédiée.

Elogen est également présente en Allemagne, avec un bureau à Cologne, où œuvrent des équipes commerciales, de gestion de projet et de R&D.

En 2021, Elogen emploie près de 50 collaborateurs et a pour objectif de réaliser un chiffre d'affaires annuel de 6 millions d'euros.

multiples usages. L'électrolyseur sera livré sur le site de Kaisersesch, en Allemagne et mis en route au cours du deuxième semestre 2022.

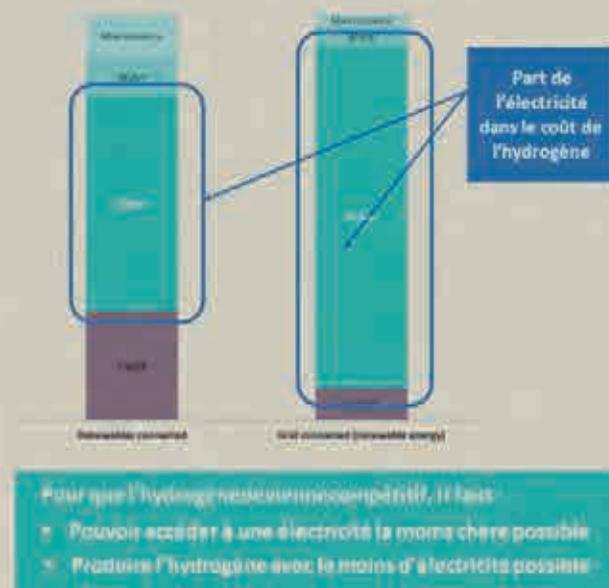
Le partenariat prévoit également le développement R&D par Elogen d'une unité de purification d'hydrogène. Cet équipement innovant sera développé aux Ulis et installé dans l'électrolyseur livré par Elogen à E.ON. Il permettra d'atteindre un niveau de pureté de 99.999 %.

**SOUPLÉSSE
DE FONCTIONNEMENT**

Jean-Baptiste Choimet met en évidence un autre intérêt de la technique PEM : sa grande flexibilité pour assurer un régime de production nominal en continu ou bien pour stopper la production d'hydrogène ou au contraire la "booster". En quelques secondes, le système fonctionne selon la nouvelle consigne de production. Pour les énergies renouvelables, par essence intermittentes, la technique PEM constitue donc la meilleure alliée lorsque l'électrolyseur est directement couplé à un champ éolien ou à un champ solaire : elle est capable de répondre instantanément aux variations de production, avec un très court temps de réaction.

L'ENJEU DU COÛT DE L'HYDROGÈNE VERT

Décomposition du coût de l'hydrogène (€/kg) - base 100



10 © ELOGEN

- 10- L'enjeu du coût de l'hydrogène vert.
- 11- Électrolyseur Elogen pour la mobilité à Rodez, dans l'Aveyron.
- 12- Banc d'essai de R&D d'Elogen sur le site des Ulis.



11 © ELOGEN



12 © ELOGEN

INTÉGRATION À GTT

GTT (Gaztransport & Technigaz) est une société d'ingénierie spécialiste des systèmes de confinement à membranes dédiés au transport et au stockage du gaz liquéfié, et en particulier du gaz naturel liquéfié (GNL).

Il s'agissait à l'origine de deux entreprises concurrentes - Gaztransport et Technigaz - nées lorsque s'est posée la question de l'acheminement du gaz naturel liquéfié algérien du Sahara vers l'Europe.

L'idée d'un gazoduc traversant la Méditerranée ayant rapidement été abandonnée, les deux entreprises ont développé, d'abord chacune de son côté, au début des années 1960, une nouvelle technologie permettant de transporter dans les meilleures conditions économiques et techniques le gaz algérien en le stockant directement dans la coque de méthaniers, équipée à cet effet d'une membrane spéciale autorisant le transport à pression atmosphérique et à une température de -160° .

Par la suite, elles ont fait évoluer l'une et l'autre leur technique d'origine avant de fusionner en 1994.

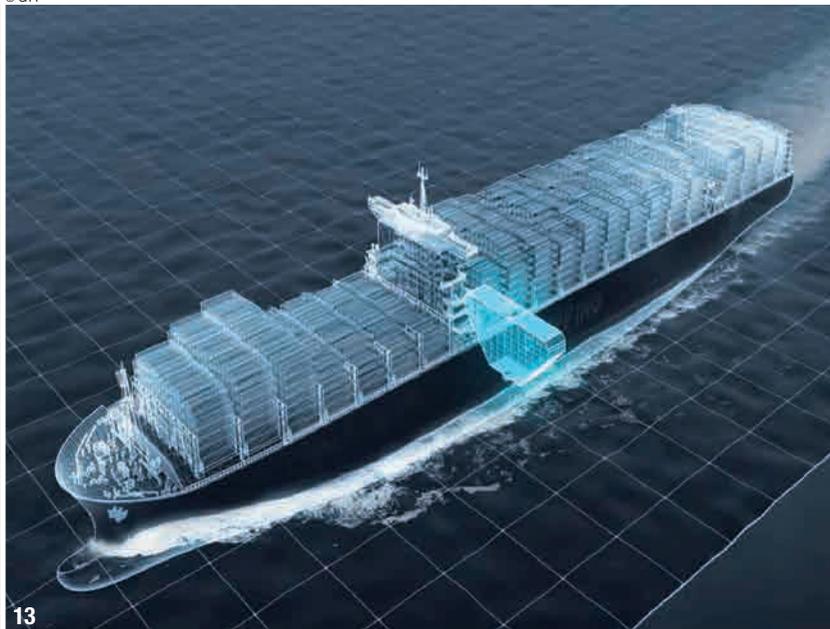
Depuis plus de 50 ans, GTT intervient avec l'ensemble des acteurs de l'industrie du gaz liquéfié : chantiers navals, armateurs, sociétés gazières, opérateurs de terminaux et sociétés de classification.

La société conçoit et commercialise des technologies alliant efficacité opérationnelle et sécurité pour équiper les méthaniers, les unités flottantes de GNL, ainsi que les navires de transport multi-gaz. L'entreprise s'est considérablement développée depuis les années 2000 lorsque sont apparues les très grandes usines de liquéfaction de gaz au Qatar, en Australie, aux États-Unis puis en Russie, approvisionnées par une flotte de quelque 560 méthaniers dont plus de 3/4 sont aujourd'hui équipés de la technologie GTT

Le groupe GTT propose également des solutions destinées aux réservoirs terrestres et à l'utilisation du GNL comme carburant pour la propulsion des navires réduisant ainsi leur empreinte environnementale, ainsi qu'une large gamme de services et de solutions digitales pour optimiser la performance opérationnelle des navires et des procédés industriels, et réduire la consommation d'énergie. Avec l'acquisition d'Elogen en 2020, GTT élargit alors son offre de technologie aux électrolyseurs pour la production d'hydrogène vert.

Le groupe GTT, dont la raison d'être est "Technology for a Sustainable World", est ainsi un acteur clé de la transition énergétique et du développement durable.

© GTT



13



14

© GTT / ROLAND MOURON

« Nous sommes par ailleurs convaincus que cette technologie dispose d'un potentiel d'amélioration considérable en termes d'efficacité. Avec nos collègues de GTT, nous avons développé un modèle interne pour calculer le coût de l'hydrogène selon un projet donné, à partir de deux cas : lorsque l'électrolyseur est connecté à un champ d'énergie renouvelable et lorsqu'il est connecté directement au réseau électrique. Le constat que l'on a fait est que, quel que soit le système de connexion, ce qui contribue de façon majoritaire au coût de l'hydrogène vert est le coût de l'électricité. Pour que l'hydrogène vert devienne compétitif, il faut pouvoir accéder à une électricité la moins chère possible et produire l'hydrogène vert avec le

13- Porte-conteneurs avec cuve GNL fabriquée par GTT.

14- Intérieur d'une cuve de GNL réalisée par GTT dans un porte-conteneur.

moins d'électricité possible. Nous pouvons donc agir pour nos clients au niveau de l'électrolyseur : il faut que ce dernier consomme le moins d'électricité possible. C'est pourquoi nous travaillons non seulement sur les composants du stack, mais aussi sur le design de la machine en utilisant notamment des pompes et

des redresseurs plus performants. »

L'objectif d'Elogen vise également à réduire le plus possible le coût d'investissement pour les clients.

Pour parvenir à ce double objectif de réduction de l'investissement pour les clients et d'amélioration des performances de l'électrolyseur, l'entreprise s'appuie sur trois axes au niveau de la R&D - Balance of Plant, nouveaux stacks, matériaux innovants - avec une équipe qui a été considérablement renforcée depuis son entrée dans le groupe GTT (voir encadré ci-dessus).

MONTÉE EN PUISSANCE INDUSTRIELLE

Des synergies évidentes existent entre les deux sociétés, tant techniques qu'humaines auxquelles s'ajoute

une proximité géographique facilitant les contacts. Depuis son acquisition par GTT en octobre 2020, Elogen a d'ailleurs intégré dans son équipe de R&D plusieurs anciens collaborateurs de GTT qui contribuent aux développements en cours aux Ulis, en particulier pour les objectifs de montée en puissance industrielle.

Parmi les projets en cours, celui de construire des stacks de plus grande puissance capables de produire, unitairement, au minimum 400 kg/j d'hydrogène constitue un axe majeur. « Le sens de l'histoire est de se diriger vers des électrolyseurs qui constitueraient à eux seuls des usines de production d'hydrogène. La massification de la production est un objectif prioritaire. »



15

© ELOGEN

D'où notre projet de gigafactory en cours de développement dans le cadre du programme européen d'investissements en faveur de la filière hydrogène. »

La recherche de composants nouveaux, notamment au niveau du polymère constitutif de la membrane et des catalyseurs, est lancée. Elle s'appuie sur des compétences en interne ainsi que sur des partenariats industriels, et des acteurs académiques, l'objectif final étant de produire plus et au coût le plus bas.

La montée en puissance industrielle est déjà en cours sur le site des Ulis. Début novembre 2021 a démarré l'installation d'une ligne pilote d'assemblage de stacks - en salle blanche - qui sera opérationnelle début 2022 : la capacité de production sera ainsi portée à 160 stacks/an, sachant qu'aujourd'hui, parmi les acteurs majeurs de l'électrolyse, Elogen est le seul à produire en France et qu'il sera, à l'horizon 2022, le plus important en France en unités de production.

Pour le projet de gigafactory, une première étude de la partie productive de l'usine a été confiée à un partenaire extérieur incluant les différents postes d'assemblage, les zones de stockages, les flux au sein de l'usine, les machines à acquérir ou à développer. La recherche d'un site en France pour implanter l'usine est en cours : un cer-

tain nombre de lieux ont été pré-sélectionnés et sont en cours d'évaluation. À partir de 2024, seront réalisés dans cette usine des systèmes d'électrolyse haute puissance.

L'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ SOUTENU PAR LA FRANCE

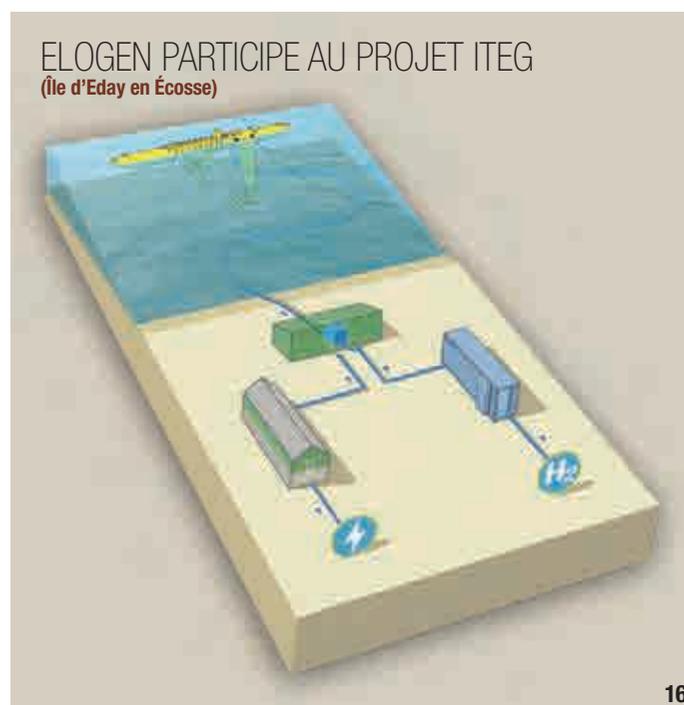
Le projet de gigafactory d'Elogen s'inscrit dans le cadre du programme

national et européen PIIEC/IPCEI (Projet Important d'Intérêt Européen Commun/Important Project of Common European Interest) destiné à soutenir le développement de la filière hydrogène.

En effet, la France poursuit son objectif de décarbonation de l'industrie. Son souhait est de développer le secteur industriel d'un point de vue éco-

15- Futur site d'installation de l'électrolyseur HypSTER à Etrez, dans l'Ain.

16- Sur l'île d'Eday en Écosse, Elogen participe au projet ITEG qui combine un convertisseur flottant d'énergie marémotrice avec un électrolyseur Elogen innovant de 1 MW.



16

© EMEC/ITEG

logique, technologique et économique. Son ambition est de réduire les émissions en favorisant l'émergence d'énergies renouvelables tout en permettant aux industries de mieux stocker l'énergie : dans l'optique de décarbonation de l'industrie française, l'hydrogène décarboné est une des solutions retenues.

À l'instar du projet européen sur les batteries, le programme IPCEI de l'hydrogène soutient notamment la R&D et l'industrialisation d'électrolyseurs pour produire de l'hydrogène décarboné et déployer ces solutions dans l'industrie. Il concerne donc des projets de "gigafactory" d'électrolyseurs de nouvelle génération, ainsi que l'industrialisation d'autres briques technologiques dans

une logique d'intégration de la chaîne de valeur au niveau européen. La France réservera une dotation financière exceptionnelle de 1,5 Md€ dans le cadre de cette action.

DE NOUVEAUX USAGES IMMINENTS

Les développements attendus par Elogen et pour lesquels elle oriente, par anticipation, ses recherches concer-

17- Projet SmartQuart d'E.ON : l'électrolyse PEM au cœur d'un laboratoire à taille réelle de l'énergie du futur.

18- Le siège d'Elogen aux Ulis dans l'Essonne (Île-de-France).

19- Un indicateur du développement de l'hydrogène : TotalEnergies et Daimler Truck AG ont signé un accord sur leur engagement en faveur de la dé-carbonisation du fret dans l'Union européenne. Ils souhaitent collaborer au développement d'écosystèmes pour les poids lourds fonctionnant à l'hydrogène, avec l'intention de démontrer l'attrait et l'efficacité du transport routier alimenté par de l'hydrogène propre.

ÉLECTROLYSE : TROIS TECHNOLOGIES

Il existe trois technologies d'électrolyse pour produire de l'hydrogène.

La plus ancienne est celle dite " alcaline ". Elle met en œuvre un électrolyte liquide, généralement de la potasse chaude sous pression (60°C).

La technologie " PEM ", développée par Elogen, fait appel à un électrolyte solide, en l'occurrence une membrane en polymère échangeuse de protons, à une température autour de 60°C.

La troisième appelée SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cells) ou " haute température ", est en cours de développement. Elle utilise un électrolyte solide - une membrane en céramique - mais nécessite un fort apport de chaleur, de l'ordre de 800°C.

nent de nouvelles applications : le chauffage urbain et le transport lourd (autobus, autocars, camions, matériels logistiques d'aéroport, trains). Dans la sidérurgie, des industriels travaillent déjà pour remplacer leurs process à base d'hydrocarbures par de l'hydrogène vert.

« C'est la raison pour laquelle un consensus s'est formé, conclut Jean-Baptiste Choimet, selon lequel la consommation d'hydrogène dans le monde est appelée à augmenter, car de nouveaux usages utiliseront l'hydrogène comme vecteur d'énergie et remplaceront des énergies plus conventionnelles et, surtout, plus polluantes. Pour parvenir à cet objectif, l'enjeu est double : il faut décarboner la production actuelle d'hydrogène pour les usages déjà en place et il faut par ailleurs accompagner le développement des nouveaux usages afin qu'ils soient vertueux. »

Deux chiffres laissent préfigurer l'évolution : la capacité d'électrolyse mondiale installée en 2020 est de l'ordre de 300 mégawatts. Pour la fin de la décennie, l'Europe prévoit d'être passée à une capacité de 40 gigawatts. L'hydrogène vert est un des leviers d'avenir pour accélérer la transition énergétique et environnementale vers la neutralité carbone. Face à l'urgence climatique, Elogen a donc l'opportunité d'agir aujourd'hui en industrialisant sa filière, pour faire la différence. □

SmartQuart : L'ÉLECTROLYSE PEM D'ELOGEN, AU CŒUR D'UN LABORATOIRE À TAILLE RÉELLE DE L'ÉNERGIE DU FUTUR (Allemagne - 2022)

Elogerfournit E.ON

- ✓ Un électrolyseur PEM innovant d'une puissance de 1 MW
- ✓ R&D sur une unité de séchage d'hydrogène
- ✓ Compression jusqu'à 70 bar
- ✓ Maintenance & Services
- ✓ Extraction de la chaleur résiduelle

SmartQuart : 1 Invest dans le cadre du projet « alliéement de l'Énergie et des Affaires industrielles » dans le cadre de ce contrat. Realisation : GTC, Energieservice. 2 Développé par le ministère fédéral d'Énergie. Il est sans subventionner par des fonds publics.

© ELOGEN 17

1- **HyPSTER** : Hydrogen Pilot Storage for large Ecosystem Replication ou démonstrateur de stockage d'hydrogène duplicable sur d'autres écosystèmes.

2- **Elogen** (ex Areva H2Gen) et **Storeng** ont également collaboré dans le cadre du projet Méthycentre.



18 © ELOGEN



19 © DAIMLER TRUCK



© ALVARO LÓPEZ PARRA

CONSTRUCTION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE DE NÚÑEZ DE BALBOA (500 MW)

AUTEURS : FULGENCIO TOMÁS DEL REY, RESPONSABLE DE PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE, DPT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, EIFFAGE ENERGÍA - ALVARO LÓPEZ PARRA, CHEF DE PROJET, DPT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, EIFFAGE ENERGÍA - SANDRA SÁNCHEZ BRAVO, INGÉNIEUR DE PROJETS, DPT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, EIFFAGE ENERGÍA - M^{re} ANGELES CASTELLANOS, DIRECTRICE DE LA COMMUNICATION ET DU MARKETING, EIFFAGE ENERGÍA

EN OCTOBRE 2018, LE PROJET NÚÑEZ DE BALBOA SL, POUR LE COMPTE DU GROUPE IBERDROLA, A CONFIE LA CONSTRUCTION CLÉ EN MAIN DE LA CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DE NÚÑEZ DE BALBOA À EIFFAGE ENERGÍA, POUR UN MONTANT DE 45 M€. LE PROJET, D'UNE CAPACITÉ DE 500 MWC (391 MW DE PUISSANCE MAX. DE RACCORDEMENT AU RÉSEAU), ÉTAIT LA PLUS GRANDE INSTALLATION DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE EN EUROPE CONSTRUITE À CE JOUR.

Au sein du groupe Eiffage, Eiffage Energía, par le biais de son Département des Énergies Renouvelables, combine l'expérience et la capacité nécessaires pour entreprendre des projets d'envergure dans le domaine de la production d'électricité, et s'affirme ainsi comme l'un des plus grands constructeurs d'installations photovoltaïques dans les différentes catégories de construction (EPC, BOS, BOP).

Le parc photovoltaïque de Núñez de Balboa est situé à Usagre et Hinojosa del Valle, dans la province de Badajoz. Sa superficie totale est d'environ 1 000 ha. Le parc fournira de l'énergie propre à 250 000 personnes, soit une

population supérieure à celle des villes de Cáceres et Badajoz, empêchant ainsi l'émission de 215 000 t de CO₂ dans l'atmosphère par an. Ce projet a démontré le ferme engagement du groupe Iberdrola envers les énergies renouvelables, la communauté autonome d'Estrémadure ayant été choisie comme zone stratégique pour y implanter celui-ci et de nombreux autres projets à venir (figure 2).

PRÉSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ

La centrale a dû être conçue et construite (figure 3) en respectant différentes exigences et les conditions présentes sur le site d'implantation et,

1- Vue aérienne d'une partie du chantier. On y voit les centres de transformation, une partie du réseau de voies d'accès et l'installation des panneaux.

1- Aerial view of part of the construction site. You can see the transformation centres, part of the access road system, and panel installation.

en règle générale, en préservant la biodiversité et notamment :

- Les zones abritant des espèces végétales protégées (chênes, orchidées...);
- Les zones d'observation des espèces d'oiseaux protégées;
- Le bassin versant de la Confédération hydrographique du Guadiana;
- Les zones d'importance archéologique;
- Les infrastructures des propriétaires de parcelles.

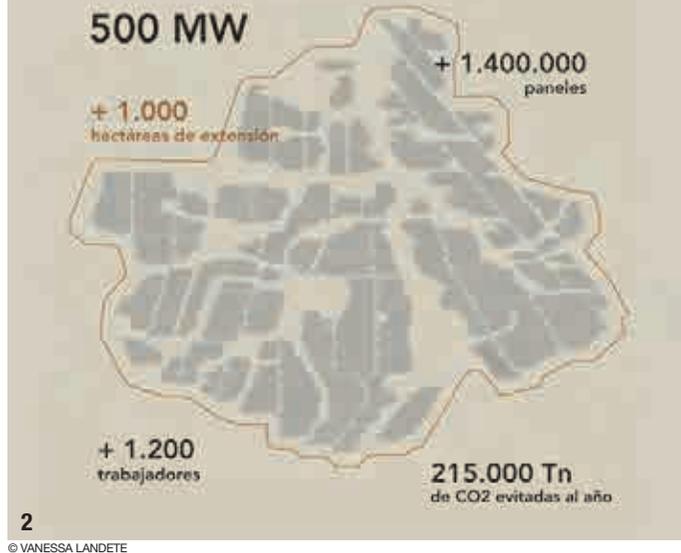
La construction du parc a débuté fin 2018, avec l'aménagement des accès et la création de l'esplanade de 3 ha qui accueillera les baraquements de chantier et la principale zone de stoc-

kage du parc photovoltaïque. En raison de l'ampleur du projet et de son délai d'exécution serré, les équipes d'ingénierie nécessaires à sa réalisation ont été très nombreuses. Ainsi, les infrastructures nécessaires pour proposer des services au personnel du groupe Iberdrola, comme ses sous-traitants, d'une part, et au personnel d'Eiffage Energía, d'autre part, ont été intégrées. Les principales infrastructures liées au chantier étaient les suivantes : modules de bureaux de chantier avec différentes zones et plus de 50 postes de travail destinés aux équipes de gestion du projet, salles de formation et de premiers secours ; une installation électrique via 2 groupes électrogènes de 100 KVA chacun ; sanitaires et installations de communication afin d'assurer une couverture mobile ; un accès à Internet pour toutes les équipes impliquées dans la gestion du projet.

L'ASSEMBLAGE MÉCANIQUE, L'UN DES DÉFIS MAJEURS DU PROJET

L'installation mécanique des structures de support des modules photovoltaïques a débuté fin janvier 2019. Le système qui a été choisi est une structure fixe, qui permet d'orienter les modules photovoltaïques vers le sud et de les incliner à 23° (figure 4) pour optimiser l'apport solaire et améliorer la production d'énergie, le tout en fonction

PLAN GÉNÉRAL DU SITE, SUR LEQUEL ON VOIT LA DISPOSITION DES MODULES ET DES DONNÉES D'ORDRE GÉNÉRAL



2- Plan général du site, sur lequel on voit la disposition des modules et des données d'ordre général.

3- Le parc vu du niveau du sol.

2- General site plan, showing the layout of the modules and general information.

3- Ground-level view of the farm.

de la longitude et de la latitude du site. Chaque sous-structure ou table est composée de différents profilés métalliques en acier galvanisé à chaud, l'ensemble offrant la conception et les dimensions nécessaires pour pouvoir installer 30 modules photovoltaïques disposés en 3 rangées et 10 colonnes avec le module en position verticale. Avec 47 694 tables installées dans le parc, l'assemblage mécanique a été l'un des défis majeurs du projet.

Les fondations nécessaires pour garantir la stabilité, la résistance et la durabilité des structures de support ont été conçues sur la base des caracté-

ristiques du site et des résultats des tests d'arrachement réalisés sur place. Ces fondations ont été de 3 types : battage de pieux, pré-installation plus battage et micropieux. Chaque table de la structure possède 6 fûts. Ainsi, à la fin du projet, 286 164 fondations ont été réalisées (figure 5).

Les infrastructures civiles suivantes ont été réalisées :

- Une clôture périmétrique, avec un maillage de type cynégétique pour permettre le passage des petits mammifères, selon les exigences environnementales, et des poteaux peints en couleur ocre pour éviter les reflets susceptibles de gêner les oiseaux. Un périmètre de 25 km a été réalisé avec ce type de clôture ;
- Un réseau de voies d'accès intérieures (29 km) et extérieures (7,5 km) pour permettre l'accès aux différentes zones du site pour tous les véhicules et moyens de transport pendant la construction, qui sont désormais utilisées par le personnel d'exploitation et de maintenance dans le cadre de ses fonctions (figure 6) ;
- Des fondations adaptées aux centrales électriques (115) ;
- Un réseau d'assainissement, avec des actions spéciales aux croisements avec les vallées de la Confédération hydrographique du Guadiana.



INFRASTRUCTURES DE GÉNÉRATION, DE CANALISATION ET DE TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE, ÉTAPE PAR ÉTAPE

Le site photovoltaïque se compose de 1 430 820 modules photovoltaïques (figure 7) répartis en 115 sous-installations. Les modules installés font appel à la technologie monocristalline et polycristalline. Ils offrent jusqu'à 8 puissances unitaires différentes, de 325 Wp pour la puissance la plus faible à 370 Wp pour la plus élevée. Tous les modules de chaque unité secondaire sont du même type (même fabricant, même technologie et même puissance unitaire). Ceux-ci sont reliés en série par tranches de 30 unités afin d'atteindre des niveaux de tension selon la plage de fonctionnement de l'onduleur, en fonction de la courbe de suivi du point de puissance max. Dans chaque sous-unité, l'énergie générée en courant continu par les modules est acheminée vers la centrale à l'aide d'un réseau de distribution principalement composé :

- De faisceaux sertis d'attaches de câble, qui regroupent les séries de modules 3 par 3 et se raccordent au réseau aérien de courant continu. Ces faisceaux assurent la protection électrique des modules photovoltaïques contre les courants inverses en cas de défaut, à l'aide de fusibles ;
- D'un réseau aérien de courant continu (lignes de courant continu secondaires) composé de câbles en aluminium à double isolation, qui offre une tension de fonctionnement de 1 500 V, avec des sections de câblage variables, et dont le courant est en grande partie acheminé par les sangles des structures de support des modules photovoltaïques jusqu'aux boîtiers de sectionnement CC ;
- De boîtiers de sectionnement CC, qui permettent de connecter jusqu'à 3 lignes aériennes de courant continu et offrent des sectionneurs de coupure en charge, tout en garantissant une protection contre les surtensions de type II. Ces boîtiers sont indispensables pour les manœuvres habituelles effectuées lors de la phase d'exploitation et de maintenance.
- De lignes de courant continu principales, composées, comme les lignes secondaires, de câbles en aluminium à double isolation, et qui offrent une tension de fonctionnement de 1 500 V, avec des sections



STRUCTURE FIXE 3V10, INSTALLÉE DANS LA TOTALITÉ DE LA CENTRALE

de câblage variables, et principalement enfouies dans des tranchées réalisées dans du sable jusqu'à la centrale électrique de l'unité secondaire.

Le terme "centrale électrique" désigne l'ensemble d'équipements qui permet de transformer l'énergie en courant continu générée par le parc photovoltaïque en courant alternatif,

4- Structure fixe 3V10, installée dans la totalité de la centrale.

5- La phase de battage correspond à la première phase d'assemblage mécanique.

La structure est montée sur les pieux sur lesquels les modules seront installés.

6- L'une des voies d'accès.

4- Fixed 3V10 structure, installed in the entire plant.

5- The pile driving phase is the first phase of mechanical assembly. The structure is mounted on piles on which the modules will be installed.

6- One of the access roads.



via l'onduleur, et d'augmenter ensuite la tension de sortie à l'aide du transformateur de puissance, jusqu'à atteindre la valeur de tension moyenne du réseau, soit 30 KV. Les principaux éléments de la centrale électrique sont les suivants :

→ Unités de raccordement CC, dont la principale fonction est de collecter l'énergie générée par les principales lignes de courant continu (16 ou 18 entrées selon le modèle). Elles assurent la protection du pôle positif et du pôle négatif à l'aide de fusibles, et offrent une protection contre les surtensions de type I + II, un dispositif de mise à la terre d'isolement destiné à

7- Installation du dernier module de la centrale, pendant la semaine 50.

8- La manipulation des bobines nécessite des personnels qualifiés.

7- Installation of the last plant module, during week 50.

8- Coil handling requires skilled personnel.



7 © SANDRA SANCHEZ BRAVO

empêcher les défauts de terre, des sectionneurs pour les deux pôles et des moyens de mesure du courant. Leur enveloppe est étanche (IP54) et le système fonctionne de manière flottante ;

→ Onduleur. Il s'agit d'un élément fondamental de toute installation photovoltaïque. Le modèle installé (un par centrale électrique) possède une puissance nominale de 3500 KVA (25°C), avec une

intensité CA maximale de 3000 A. Il se compose de 7 modules indépendants destinés à la surveillance du point de puissance maximale (MPPT), et fonctionne selon le principe maître/esclave. L'onduleur présente une fenêtre de surveillance du point de puissance maximale entre 976 et 1310 VCC, tandis que la tension de sortie est constante à 690 VCA, avec une fréquence de 50 Hz et un facteur de puissance réglable. La tension maximale de l'ensemble est de 1550 VCC. Avec son enveloppe adaptée à une installation en extérieur (IP54), l'onduleur peut fonctionner à une température comprise entre -20 et 50°C ; pour cela, il intègre un système de ventilation forcée, ainsi qu'un dispositif de contrôle de l'humidité grâce à des corps de chauffe actifs, le tout avec un niveau d'émissions sonores inférieur à 79 dB ;

→ Transformateur de puissance. Relié directement à l'onduleur par une barre omnibus et offrant une puissance de 3500 KVA à 25°C, il élève la tension de 690 VCA à 30 KV en moyenne tension. Il est conçu pour fonctionner en extérieur à une température comprise entre -5 et 40°C, et dispose d'un refroidissement à l'huile ONAN. Il s'agit d'un modèle à faible perte, de conception ECO, DY11, équipé d'un système de protection DGPT2 relié à la cellule de protection du transformateur ;



8 © SANDRA SANCHEZ BRAVO



9- Les lignes sont directement enfouies dans une tranchée de sable. Une fois leur pose terminée, elles sont fixées trois par trois puis recouvertes avec du sable et du remblai.
10- Panneaux photovoltaïques fixes.

9- The lines are buried directly in a trench of sand. Once the lines have been laid, they are attached in threes and then covered with sand and backfill.
10- Fixed photovoltaic panels.

→ Cellules de protection en moyenne tension : juste après le transformateur de puissance se trouve un ensemble de cellules internes, installées dans un bâtiment aménagé à cet effet, avec une configuration 2L + V (2 fonctions de ligne et une fonction de protection de transformateur). La protection du transformateur est assurée par une cellule de disjoncteur automatique. Les cellules de ligne abritent les raccordements à la ligne de moyenne tension de 30 KV qui évacue toute l'énergie générée dans chaque sous-unité

vers la sous-station élévatrice de la centrale ;
 → Transformateur de services auxiliaires : avec le panneau basse tension, il permet l'alimentation des différents équipements auxiliaires, de commande et de ventilation de la centrale. Il s'agit d'un transformateur sec avec une puissance de 25 KVA et un groupe de connexions Yyn0. En tant que principal système de distribution d'énergie, la centrale photovoltaïque de Núñez de Balboa dispose d'un réseau interne moyenne tension de 30 KV. Ce réseau est composé de 24 circuits. Chaque circuit relie 4 ou 5

centrales électriques et évacue l'énergie générée vers la sous-station élévatrice de la centrale, elle-même connectée à la ligne de transmission haute tension 400 KV. La longueur totale du réseau de moyenne tension est de 77 km. Ce réseau est composé de câbles de type HEPRZ1 18/30 KV avec conducteur en aluminium (figures 8 à 12).

MESURES ET SURVEILLANCE POUR LE CONTRÔLE ET L'EXPLOITATION DE LA CENTRALE
 Afin de contrôler les différentes variables météorologiques et, de mesurer et d'enregistrer le rayonnement solaire et

la température de fonctionnement des modules pour le calcul du RP (rapport de performances) de la centrale, 20 stations météorologiques ont été installées et réparties sur tout le site. Selon le nombre de capteurs et d'éléments de mesure qui composent une station météo, on distingue 2 catégories :
 → Les stations météorologiques secondaires (14 unités installées), avec une structure en treillis, une armoire de protection, un pyromètre incliné, un capteur de température et d'humidité relative et un capteur de température des modules ;





11

© ÁLVARO LÓPEZ PARRA

→ Les stations météorologiques principales (6 unités installées), qui intègrent le même équipement que les stations météorologiques secondaires, ainsi qu'un pluviomètre, un pyranomètre horizontal et un émetteur compact.

Les différents éléments et capteurs qui composent les stations météorologiques sont :

→ Une structure en treillis, dans laquelle les capteurs sont montés sur une structure en treillis de 3 m de haut. La structure pourra supporter les capteurs, et résiste à toutes sortes de contraintes pou-

vant survenir en cas de pluie, de vent ou de neige. Elle bénéficiera aussi d'une protection contre la foudre, grâce à un parafoudre de type Franklin ;

→ Une armoire de protection, dans laquelle se trouve l'enregistreur de données (qui collecte les mesures des différents capteurs et permet de les contrôler), l'alimentation électrique avec ses protections et le système de communication avec l'unité de contrôle ;

→ Pyranomètre. Il s'agit d'un capteur de mesure du rayonnement solaire, qui se trouve dans la structure en

treillis, en position horizontale, ou dans la structure des modules photovoltaïques si celle-ci est en position inclinée (23°) ;

→ Transmetteur compact pour la mesure de la vitesse et de la direction du vent ;

→ Capteurs de température ambiante et d'humidité relative, composés d'un élément capacitif d'humidité et d'une sonde de température PT100 ;

→ Capteurs de température des modules, avec les supports nécessaires pour les installer à l'arrière des modules ;

→ Pluviomètre : permet de mesurer les précipitations.

Enfin, la centrale est complétée par le système de supervision et de contrôle (SCADA). Il s'agit d'un système conçu pour la surveillance, le contrôle et l'exploitation de la centrale.

Grâce au système SCADA, les fonctions suivantes peuvent être exécutées :

→ Acquisition des données de tous les éléments du parc intégrés au système, notamment :

- Onduleur,
- Unités de raccordement CC,
- Cellules de protection en moyenne tension,

11- Photo aérienne d'une partie du chantier. On y voit les centres de transformation, une partie du réseau de voies d'accès, et l'installation des panneaux.
12- Vue aérienne panoramique.

11- Aerial photo of part of the site. You can see the transformation centres, part of the access road system, and panel installation.
12- Panoramic aerial view.



© MISSEL ANGLIO PRIETO

12

- Transformateur de puissance,
- Transformateur de services auxiliaires,
- Stations météorologiques,
- Compteurs d'usage,
- Sous-station élévatrice,
- Régulateur d'unité (PPC) ;
- Mise à disposition d'une interface graphique pour la surveillance et le contrôle en temps réel ;
- Traitement et gestion des alarmes ;
- Génération de rapports, traitement et analyse des données ;
- Gestion du stockage dans une base de données ;
- Exportation de données ;
- Connexion directe avec les opérateurs de réseau, et avec les éléments de surveillance centralisés.

L'architecture du système SCADA se compose principalement d'un élément appelé "Tableau de bord" (Unité de

contrôle), présent dans chaque centrale électrique (115) et dans la sous-station élévatrice.

Les fonctions principales des tableaux de bord sont le stockage des données et la réalisation des calculs nécessaires à l'exploitation adéquate du parc photovoltaïque.

Les tableaux de bord sont reliés les uns aux autres à l'aide d'un réseau de fibre optique, qui présente les caractéristiques suivantes :

- 7 anneaux de fibre optique indépendants ont été créés. Ces anneaux sont adaptés aux circuits du réseau de moyenne tension du parc photovoltaïque, et sont reliés entre eux au sein de la sous-station ;
- Au total, 43 000 m de fibre optique ont été installés. Cette fibre est de

type monomode et comporte un câble à 16 brins.

L'un des éléments importants intégrés au système SCADA est le régulateur d'unité, ou PPC, qui sert à réguler certains paramètres ou points de consigne définis par le gestionnaire de réseau (REE), afin de pouvoir respecter les réglementations établies par celui-ci au niveau du point d'interconnexion au réseau.

Le régulateur d'unité permet de réguler les paramètres suivants :

- Tension au sein de la centrale ;
- Fréquence ;
- Limitation de production ;
- Limitation de puissance ;
- Régulation de la puissance réactive, en modifiant le facteur de puissance de l'installation. □

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES ET QUANTITÉS

PUISSANCE MAXIMALE TOTALE INSTALLÉE (MWp) : 499,82

PUISSANCE NOMINALE TOTALE (MWac) : 402,5

MODÈLE DE MODULES FV :

	LR6-72PH 365 Wp		LR6-72PH 365 Wp			GCL-P6/72H		
Puissance des modules (Wp)	365	370	330	335	340	325	330	335
Nombre de modules installés	222300	456300	66150	194400	38340	41040	319680	92610

NOMBRE TOTAL DE MODULES : 1 430 820

TYPE DE STRUCTURE : Structure fixe 3V10

NOMBRE DE STRUCTURES INSTALLÉES : 47 694

MODÈLE D'ONDULEUR : HEC 1500V

NOMBRE D'ONDULEURS : 115

NOMBRE DE CENTRES DE TRANSFORMATION : 115

CÂBLES MT (mètres installés) : 222 000

CÂBLES BT (mètres installés) : 1 200 000

CÂBLES EN CUIVRE DÉNUDÉS (mètres installés) : 67 000

CÂBLES FO : 40 000

TRANCHÉES (mètres) : 73 000

NOMBRE DE PANNEAUX CC INSTALLÉS : 1 883

ATTACHES DE CÂBLES : 15 898

VOIES D'ACCÈS (mètres) : 38 500

CLÔTURE (mètres) : 28 300

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT

- **PROJET NÚÑEZ DE BALBOA** : financement du projet.
- **GROUPE IBERDROLA** : gestion du projet et fourniture des principaux équipements (modules photovoltaïques, structure de support et centrales électriques).

PRESTATAIRES DE SERVICE

- **EIFFAGE ENERGIA** : maîtrise d'œuvre BOP, comprenant l'ingénierie, les travaux publics, le montage mécanique, le montage électrique, le système de surveillance et les stations météorologiques, le système de sécurité passive, les essais et la mise en service.
- **CEMOSA** : suivi opérationnel et supervision du chantier.
- **GONVARRI SOLAR STEEL** : fourniture de la structure de support pour les modules photovoltaïques et supervision du montage mécanique.
- **POWER ELECTRONICS** : fourniture et mise en service des centrales électriques et PPC.
- **ECOENERGIAS DEL GUADANIA** : développement et gestion de l'environnement.

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF THE NÚÑEZ DE BALBOA PHOTOVOLTAIC POWER PLANT (500 MW)

FULGENCIO TOMÁS DEL REY, EIFFAGE ENERGÍA - ALVARO LÓPEZ PARRA, EIFFAGE ENERGÍA - SANDRA SÁNCHEZ BRAVO, EIFFAGE ENERGÍA - M^o ANGELES CASTELLANOS, EIFFAGE ENERGÍA.

Eiffage Energía has built the "Núñez de Balboa" photovoltaic power plant, at a cost of €45m. This is the biggest photovoltaic power farm in Europe, put into operation by Iberdrola at Usagre in the Badajoz province of Spain. The plant was built in record time, employing more than 1,200 workers, 70% of whom came from the Extremadura region. It will provide energy for 250,000 people per year and will prevent 215,000 tonnes of CO₂ emissions into the atmosphere each year. The plant covers an area of about 1,000 ha, and comprises more than 1,400,000 solar panels. Its installed capacity is 500 MW and its annual production is estimated at 832 GWh. □

CONSTRUCCIÓN DE LA CENTRAL FOTOVOLTAICA DE NÚÑEZ DE BALBOA (500 MW)

FULGENCIO TOMÁS DEL REY, EIFFAGE ENERGÍA - ALVARO LÓPEZ PARRA, EIFFAGE ENERGÍA - SANDRA SÁNCHEZ BRAVO, EIFFAGE ENERGÍA - M^o ANGELES CASTELLANOS, EIFFAGE ENERGÍA.

Eiffage Energía ha construido la central fotovoltaica Núñez de Balboa, por un importe de 45 millones de euros. Se trata del mayor parque fotovoltaico de Europa, puesto en servicio por Iberdrola en Usagre (Badajoz). La central, construida en un tiempo récord, ha precisado más de 1.200 trabajadores, el 70% de los cuales procedentes de Extremadura. Además, abastecerá de energía a 250.000 personas al año e impedirá la emisión anual de 215.000 t de CO₂ a la atmósfera. La central tiene una superficie de unas 1.000 ha y cuenta con más de 1.400.000 paneles solares. Su capacidad instalada es de 500 MW y su producción anual se estima en 832 GWh. □



1

© BOUYGUES-TP

LES FONDATIONS GRAVITAIRES DU PARC ÉOLIEN EN MER DE FÉCAMP, UNE USINE DE PRODUCTION À CIEL OUVERT

AUTEURS : JEAN-LUC BOUCHET, DIRECTEUR DU PROJET, BOUYGUES TP - ANTOINE AFETTOUCHE, CHARGÉ DE PRODUCTION, BOUYGUES TP - JEAN-CLAUDE GANDOLFINI, DIRECTEUR TECHNIQUE DU PROJET, BOUYGUES TP - THAÏS FOUCAULT, CHARGÉE DES ETUDES DU PROJET, BOUYGUES TP - EMMANUELLE PAYER, DIRECTRICE TECHNIQUE ADJOINTE DU PROJET, SAIPEM

AU HAVRE, LA CONSTRUCTION DES 71 PREMIÈRES FONDATIONS GRAVITAIRES FRANÇAISES POUR DES ÉOLIENNES EN MER EST EN COURS. CHACUNE SUPPORTERA UNE ÉOLIENNE D'UNE PUISSANCE DE 7 MW. CES FONDATIONS, D'ENVIRON 50 m DE HAUT ET AVOISINANT LES 5 000 t, SONT DES STRUCTURES CREUSES EN BÉTON PRÉCONTRAIT, DONT LA STABILITÉ SERA UNIQUEMENT ASSURÉE PAR LEUR EMPRISE AU SOL, LEUR POIDS ET LE VOLUME DE BALLAST INTERNE. ELLES SERONT INSTALLÉES EN MER À PARTIR DE L'ÉTÉ 2022 AVEC L'UN DES PLUS GRANDS NAVIRES-GRUES SEMI-SUBMERSIBLES AU MONDE.

PRÉSENTATION / ORGANISATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le projet consiste en la conception, la réalisation et l'installation de 71 fondations gravitaires supportant les éoliennes en mer au large de Fécamp (figure 1). Il est réalisé pour le compte du Parc éolien en mer de Fécamp porté par EDF Renouvelables, Eih S.a.r.l. (détenue par Enbridge Inc. et Cpp Investments) et wpd Offshore. Il fait

1- Vue globale
du site.

1- Overall view
of the site.

partie des projets visant à développer l'éolien en mer en France. Au sein du groupement Bsb en charge de ce projet, Bouygues Travaux Publics (mandataire) et Saipem sont associés :

ils réalisent ensemble la conception de la structure, les équipements, la construction, le transport (terrestre et en mer) ainsi que l'installation en mer et la mise en service du lot fondations. Boskalis, fait également partie de Bsb, et réalise la pose d'un lit d'assise, l'anti-affouillement autour des fondations et leur ballastage.

Le Parc éolien sera situé entre 13 et 22 km des côtes de Fécamp, au sein d'une zone de 60 km², et produira une

puissance d'environ 500 MW (produisant l'équivalent de la consommation domestique en électricité de plus de 60% des habitants de Seine-Maritime, soit environ 770 000 personnes). Sa localisation permettra de bénéficier d'un vent fort et régulier, dans des eaux d'environ 30 m de profondeur.

Les éoliennes, qui seront posées et fixées sur les fondations, sont fournies et installées par Siemens Gamesa Renewable Energy. ▶

Ces GBS (pour *Gravity Based Structure*) sont des structures creuses d'environ 1 700 m³ en béton précontraint, dont le poids, la surface et la quantité de ballast interne assurent la stabilité face aux sollicitations externes.

Les travaux de construction ont débuté au Havre à l'automne 2020 et s'achèveront à l'été 2022, pour une mise en service du Parc éolien en mer à l'horizon de la fin d'année 2023.

DE LA CONSTRUCTION DES FONDATIONS À LEUR MISE EN SERVICE

Les 71 GBS sont actuellement en cours de construction sur le quai de Bougainville dans le Grand Port Maritime du Havre.

Elles seront peintes, équipées puis levées par deux portiques via 4 bosages de levage situés sur le radier pour être posées sur des engins multi-roues qui les transporteront sur le quai, jusqu'aux barges.

Chacune des trois barges, mobilisées et équipées spécifiquement, transportera à chaque rotation 3 GBS (dernier chargement avec 2 GBS) jusqu'au site d'installation en mer, selon un cycle d'environ 1,5 jour.

Sur place, une couche d'assise granulaire aura été installée au préalable par Boskalis (couche de graviers).

Le bateau grue Saipem 7 000, l'un des plus grands navires-grues semi-submersibles au monde, équipé de deux grues de 7 000 t, lèvera chaque GBS à l'aide d'un outil de 130 t (*lifting tool*) avant de l'immerger et de la poser sur l'assise préparée sur le fond marin.

Le *lifting tool* se fixera sur un anneau de levage (*ring padeye*), sécurisé sur la GBS par 3 groupes de 8 barres, de 98 mm de diamètre, noyées dans les 3 goussets situés en partie supérieure de la fondation (*top ring*).

Lors de son immersion, la GBS se remplira d'eau par des réservations prévues dans le radier afin de respecter l'équilibre hydrostatique intérieur et extérieur de la structure.

Enfin, environ 3 000 m³ de ballast (granulat marin) seront mis en place en mer, à l'intérieur de la fondation, afin de la lester et d'en assurer la stabilité. Des réservations réalisées dans les voiles permettront l'équilibre constant entre la pression hydrostatique extérieure et intérieure (figure 2).

La durée de vie de la GBS est de 30 ans, dont 5 ans réservés à la construction/installation et au démantèlement.

CYCLE DE VIE D'UNE GBS



2

© BOUYGUES-TP

PRINCIPES DE CONCEPTION DE LA GBS

La GBS est une structure creuse en béton précontraint (figure 3). Sa hauteur varie entre 48 m et 54 m afin d'assurer un niveau émergent constant sur tout le Parc éolien.

L'enjeu principal du projet a été de trouver le juste compromis entre :

→ Une structure suffisamment fine pour être transportée, levée puis installée en mer : même si des moyens de levage très puissants sont mobilisés, le poids des GBS ne

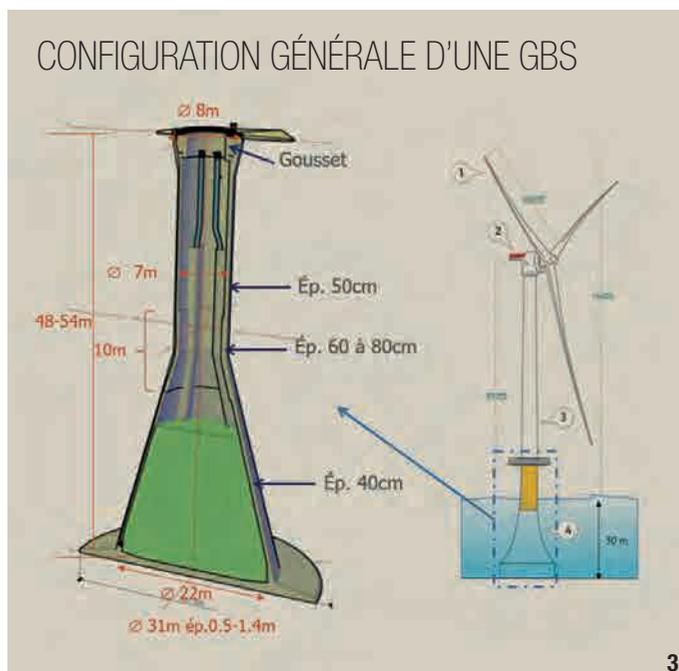
2- Cycle de vie d'une GBS.

3- Configuration générale d'une GBS.

2- Life cycle of a GBS.

3- General configuration of a GBS.

CONFIGURATION GÉNÉRALE D'UNE GBS



3

© BOUYGUES-TP

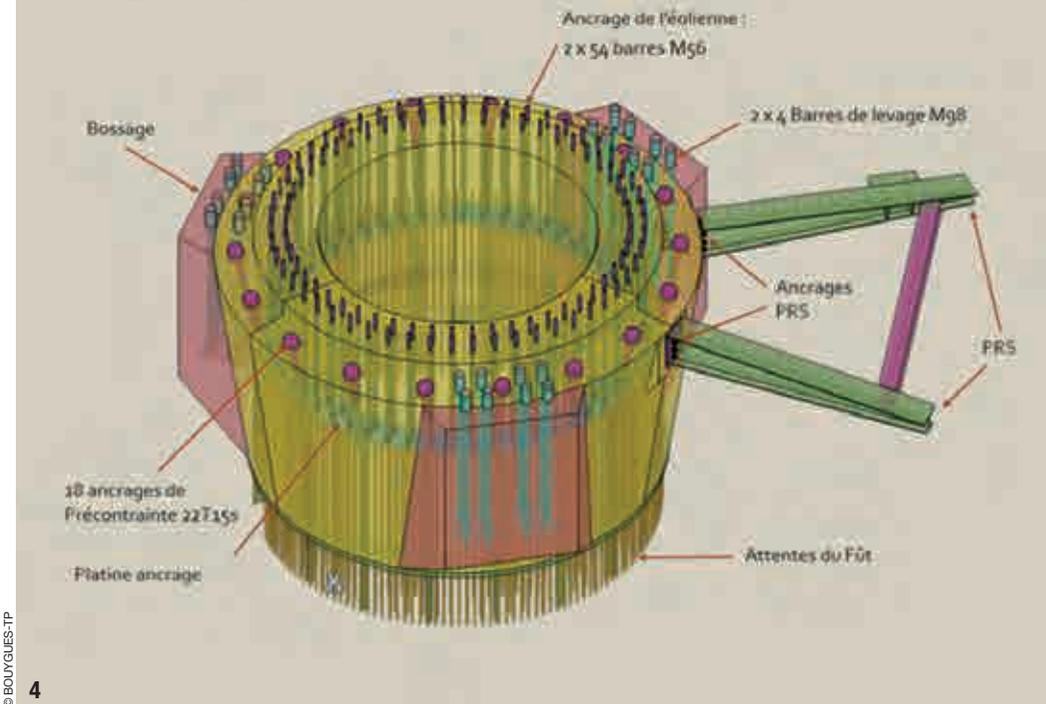
doit pas dépasser 4 800 t. Le levage d'une telle charge est par conséquent une contrainte forte conduisant à optimiser les épaisseurs ;

→ Une structure robuste qui puisse supporter les efforts extérieurs et dont la densité de ferrailage soit compatible avec les pratiques de construction.

La GBS est composée d'un radier de 31 m de diamètre et d'épaisseur variable (1 m moyen, 1,4 m au niveau de la jonction avec les voiles).

Les voiles sont coniques en partie basse, avec un diamètre extérieur variant de 22 m à la base, à 7 m en haut du cône, pour une épaisseur de 0,4 m (avec un épaissement à 0,9 m à la jonction avec le radier). Cette partie conique est identique pour toutes les GBS.

CONCEPTION DU TOP RING



Elle est surmontée d'une partie cylindrique de hauteur variable qui permet de gérer les différences de bathymétrie sur le Parc en mer (environ 6 m de variation) et d'épaisseur 0,5 m.

Entre ces 2 zones se trouve une transition épaissie à 0,6 m au minimum (zone ayant le ratio effort appliqué/inertie le plus fort).

La précontrainte verticale des voiles est réalisée par 18 câbles 22T15S régulièrement répartis sur le périmètre de la GBS, qui s'ancrent en tête (ancrage actif) et juste au-dessus du radier, en partie intérieure (ancrage passif).

Des bossages supérieurs sont prévus sur le radier (levage onshore) et sur la couronne supérieure (levage offshore). En partie basse, chacun des 4 bossages est muni de 8 tiges M83.

En partie haute, 3 bossages sont en place, avec chacun 8M98. Toutes ces tiges sont précontraintes. La zone supérieure de la GBS est particulièrement délicate et congestionnée, car elle remplit à la fois le rôle d'ancrage de l'éolienne (via 2x54 tiges M56), ▽

- 4- Conception du top ring.
- 5- Vue du chantier.
- 6- Coffrage bas.
- 7- Coffrage intermédiaire.

- 4- Top ring design.
- 5- View of the site.
- 6- Bottom formwork.
- 7- Intermediate formwork.



d'ancrage pour le levage en mer et d'ancrage pour les câbles de précontrainte (figure 4).

Une plateforme extérieure en béton vient équiper la partie haute de la GBS pour permettre l'accès à l'intérieur de la tour et à la plateforme interne, et les opérations de maintenance. L'accès à cette plateforme se fera depuis une échelle de coupée (boat landing) fixée le long de la GBS.

PRINCIPE D'OBTENTION DES CHARGES

Les charges, outre les actions permanentes, sont pour la plupart d'origine aérodynamique (vent appliqué sur l'éolienne) et hydrodynamique (effet de la houle).

Elles sont obtenues via une modélisation temporelle des effets couplés vent/houle sur la structure, tenant compte des effets dynamiques de l'ensemble de la structure (fondation et tour), du comportement du sol et des effets gyroscopiques de l'éolienne. Ce calcul, spécifique au projet éolien et appelé calcul de charges intégrées, est réalisé conjointement entre le fabricant de l'éolienne (Sgre : Siemens Gamesa Renewable Energy, pour la modélisation de l'éolienne et du vent) et le groupement Bsb (pour la modélisation de la GBS, du sol, de la houle et du courant).

Cette étude permet d'obtenir les efforts extérieurs en différents points de la structure sous forme de séries temporelles. Dans ce calcul, différents cas de charge ont été considérés, en faisant varier la vitesse du courant, son orientation, l'état d'agitation de la mer, la vitesse et l'orientation du vent, ainsi que les différents états possibles de l'éolienne (pales en drapeau, déviation d'orientation de la nacelle etc.). Ces cas de charge sont sélectionnés de sorte à couvrir l'ensemble des sollicitations vues par la structure sur la durée de vie du Parc, incluant les phénomènes extrêmes de type tempête et les phénomènes de fatigue.

Pour le projet du Parc éolien en mer de Fécamp, le nombre de cas de charge simulés s'élève à environ 60 000 par configuration.

Trois configurations sont étudiées, faisant varier profondeur et type de sol, afin de couvrir la plage de raideurs possibles de l'ensemble des structures sur le Parc.

Des essais en bassin sur une maquette réduite équipée de capteurs ont permis de valider les hypothèses de calcul de charge hydrodynamique.



8

© BOUYGUES-TP



8- Installations de chantier.
9- Vue globale d'une GBS.

8- Site facilities.
9- Overall view of a GBS.

ORGANISATION DU SITE DE CONSTRUCTION

Ce grand chantier de génie civil est composé de 11 séquences répétées 71 fois, avec de légères variations à chaque GBS, ce qui complexifie la standardisation.

La mise en place des 121 300 m³ de béton, 32 000 t d'acier, et l'habillage des 71 GBS avec les équipements nécessaires à son fonctionnement sont à réaliser en seulement 20 mois (figure 5).

En répartissant la production sur 4 lignes indépendantes et en préfabriquant le plus possible d'éléments constitutifs d'une GBS, le projet peut relever ce défi.

Sur chaque ligne, 4 grues à flèche relevable sur rails d'une capacité de 13 t à 50 m, permettent la manutention des moyens nécessaires à la construction : coffrages, cages de ferrailage préfabriquées et équipements.

Les 5 000 t de coffrages et passerelles ont été conçus selon le cahier des

9

© BOUYGUES-TP



10

© BOUYGUES-TP



11

© BOUYGUES-TP

charges du projet, par trois entreprises : Ersem, Coffrage&Equipage et Clrm. Véritable chantier dans le chantier, le montage de ces géants d'aciers a mobilisé une quarantaine de compagnons durant 6 mois (figures 6 et 7). Les cages d'armatures sont assemblées dans une zone dédiée du chantier, dans laquelle s'affaire le groupement d'entreprises Samt et Welbond. 2 grues à tour et 2 grues mobiles

10- Gabarit du top ring.
11- Peinture.
12- Conception de la GBS en 3D.

10- Size of the top ring.
11- Painting.
12- 3D design of the GBS.

distribuent les fagots de barres aux différents ateliers de préfabrication et chargent les remorques des éléments préfabriqués à destination d'une des 16 grues des lignes de production du chantier.

Deux centrales à béton opérées par LafargeHolcim, dédiées au projet, ainsi qu'une centrale réseau située à Gonfreville-L'Orcher, approvisionnement

l'ensemble des opérations de construction.

Mais cette organisation ne serait rien sans l'ensemble des équipes de production. En seulement 8 mois, les services des ressources humaines du groupement et des sous-traitants ont été amenés à mobiliser plus de 900 compagnons, une quarantaine de chefs de chantier et une centaine de techniciens, d'ingénieurs structures et travaux, de gestionnaires, préventeurs, qualitateurs, acheteurs, ... avec une large palette d'activités.

MÉTHODE DE CONSTRUCTION

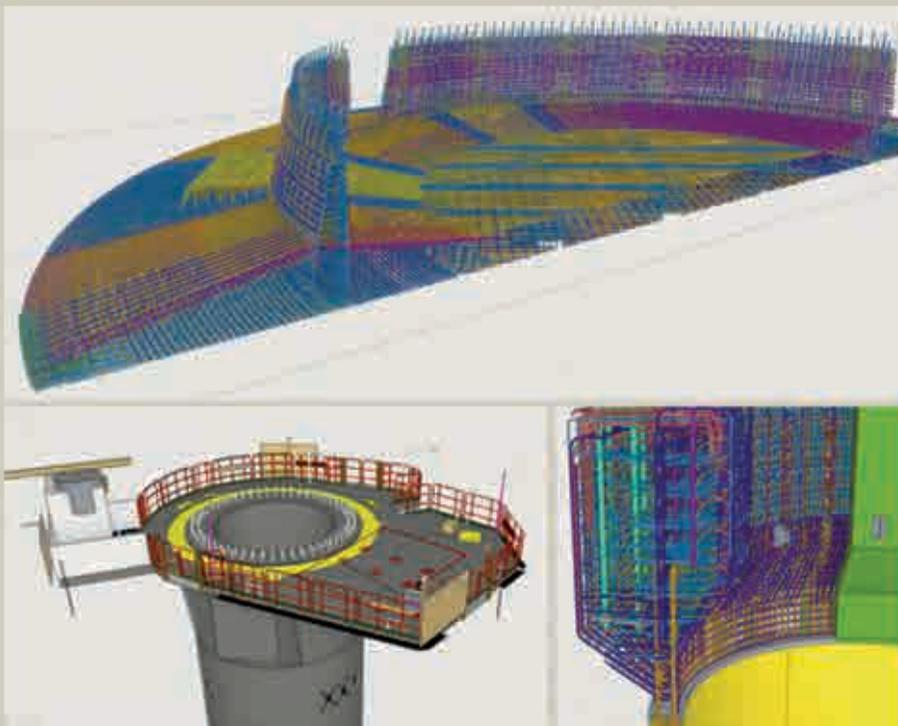
Chacune des activités est pensée indépendante des autres, et dispose de ses propres moyens, avec un bémol : une grue est partagée entre 2 activités au moins (figure 8). Pour que cette succession d'activités fonctionne, il est nécessaire de suivre le "takt time", outils de musicien, repris dans les méthodes de lean management, dont la signification est "métronome".

Le principe est simple : entre deux battements s'écoule la durée d'un cycle. À chaque battement, chaque activité passe à la GBS suivante.

Voici, en résumé, ce que sont les 11 activités (figure 9) :

- 1- Le radier : environ 200 t d'aciers, 800 m³ de béton, il est la base de la fondation. Les coffrages d'amorce de voile servent de gabarit de positionnement des inserts utiles au maintien du coffrage de levée 1 et positionnent les attentes et les ouvertures pour l'accès provisoire dans la GBS et les niches de précontrainte.
- 2- La 1^{re} levée de cône, de 11 m : de façon générale pour les voiles, le coffrage intérieur est d'abord installé, puis les cages préfabriquées d'armatures et enfin le coffrage extérieur. La forme conique nécessite la mise en place de tiges anti-soulèvement dans le radier. Des réservations sont prévues dans le coffrage afin de permettre la sortie du J-tube.
- 3- La 2^{de} levée de cône : très proche de la première, elle utilise le même type d'outils coffrants. Elle continue la géométrie conique et contient l'insert permettant le déversement du ballast dans la GBS.
- 4- La transition : elle termine la partie conique et démarre la partie fût. Si les panneaux coffrants sont imposants sur les deux premières levées, ceux de la levée 3 s'affinent. ▷

CONCEPTION DE LA GBS EN 3D



12

© BOUYGUES-TP

La levée 3 intègre les deux réservations du Pin&Bucket, pièce de maintien inférieur du boat landing.

5- Le fût :

- La 1^{re} levée de fût : élévation cylindrique de 8 m de hauteur et 50 cm d'épaisseur, elle intègre 2 niveaux de boat landing. Afin de limiter le temps de grue, le coffrage utilisé est un coffrage auto grimpant.

- La 2^{de} levée de fût : il s'agit de la "fausse" levée de la GBS. Le coffrage grimpant est élevé de la hauteur nécessaire pour augmenter la hauteur de la GBS et ainsi compenser la topographie du fond marin.

6- Le top ring, une tulipe en béton de 125 m³, intègre :

- Les tiges de fixation de l'éolienne ;
- Les tiges de levage de l'éolienne en mer ;
- Les inserts nécessaires aux tirages des câbles sous-marins ;
- Les ancrages de précontrainte ;
- Des inserts nécessaires à l'ancrage de plateforme provisoires pour la précontrainte et pour la mise en peinture.

La réalisation du top ring passe par les étapes suivantes :

- Assemblage des tiges d'ancrage de l'éolienne et de levage sur un gabarit sécable en 3 tiers ;
- Ferrailage autour de ce gabarit selon le découpage (figure 10) ;
- Pose des tiers et reconstitution de la tulipe puis vérification topographique ;
- Pose des inserts ;
- Coffrage intérieur, extérieur puis bétonnage.

7- La précontrainte : Vsl France (Bouygues Travaux Publics Régions France) intervient pour l'enfilage par le haut, la mise en précontrainte et l'injection des 18 câbles 22T15S.

8- La peinture : l'entreprise normande Lassarat peint en jaune environ 300 m² de béton correspondant aux 13,5 m supérieurs de la GBS, pour assurer la visibilité en mer de la fondation (figure 11).

9- La plateforme externe et l'intégration des équipements. Viennent ensuite :

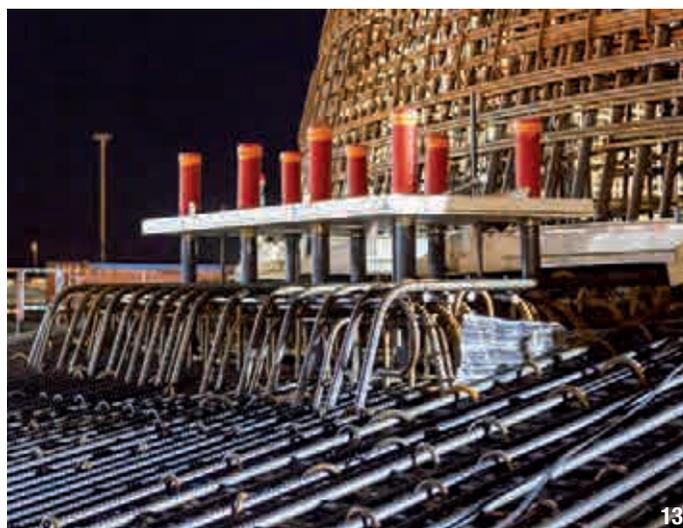
- a. La réalisation de la plateforme externe, composée des 5 pré-dalles collaborantes, intégrant la plupart des inserts dès leur préfabrication (fourreaux, ancrages, ...) ;

- b. La pose du boat landing, qui nécessite une précision diabolique de l'ensemble des inserts positionnés préalablement dans le béton ;

13- Ferrailage du bossage de levage bas.

14- Ferrailage de la levée 1 d'un voile.

13- Rebars of the bottom lifting pad.
14- Rebars of concrete lift 1 for a shear wall.



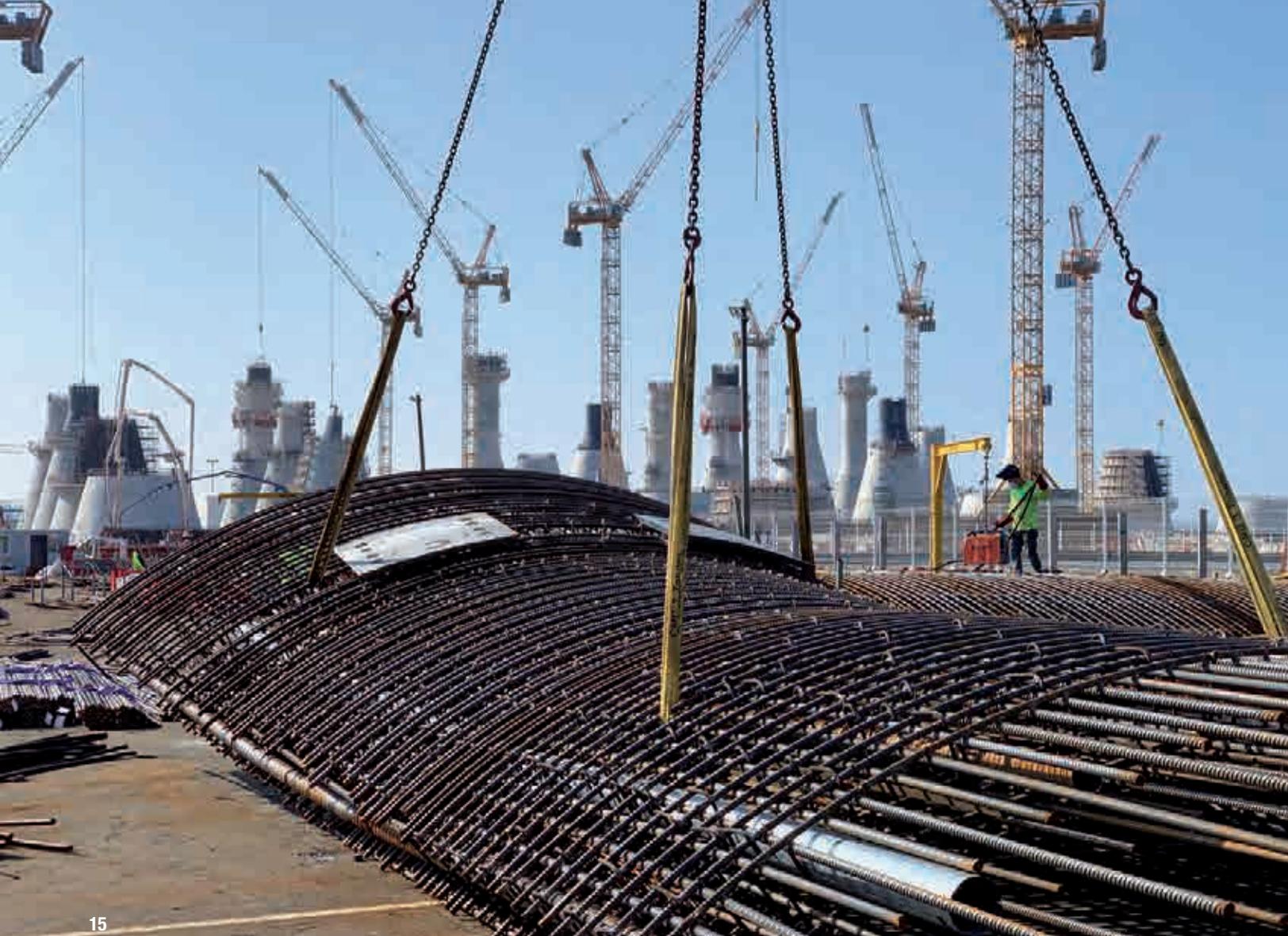
13

© BOUYGUES-TP



14

© BOUYGUES-TP



15

© BOUYGUES-TP

- c. La pose et le scellement de la levelling plate, interface ultime avec la mature de l'éolienne ;
- d. La pose de la plateforme interne et sa fixation à la GBS ;
- e. L'installation d'équipements divers (grue de manutention, tire-câble dans les J-tubes...).

10- Les travaux d'électricité et instrumentation (E&I) : cette activité, réalisée par Spie Oil & Gas Services, correspond au câblage des équipements nécessaires au fonctionnement de la GBS.

11- Le commissioning et le repli. Ultime étape, elle marque la fin de la réalisation de la GBS par sa réception à terre avec le client, avant le démontage des accès.

FERRAILLAGE CONCEPTION

La conception de la structure est entièrement faite en 3D via le logiciel Tekla pour le coffrage et le ferrailage (figure 12). La modélisation 3D a permis :

- D'élaborer les plans de coffrage et coupes 2D ;
- De produire les plans de ferrailage (plans, coupes, directement liés au coffrage) ;
- De fournir les plans de précontrainte ;

15- Levage d'une cage de ferrailage de la levée 3.
16- Ferrailage du top ring.

15- Lifting a rebar cage for concrete lift 3.
16- Top-ring rebars.

- D'intégrer les équipements extérieurs (cônes de coffrage et de passerelles, platines, équipements de la plateforme, tiges de levage, ...) ;
- De concevoir les zones à géométrie très complexe et variable, comme la tête de la GBS, et de gérer les conflits d'armatures dans ces zones ;
- De communiquer de façon plus fluide sur des zones où les plans sont souvent surchargés.

La modélisation s'est faite de façon collaborative entre les projeteurs travaillant simultanément sur différentes zones de la même maquette.

Le contrôle du ferrailage par le bureau de contrôle et les équipes du Parc éolien en mer de Fécamp s'est fait directement sur la maquette, avec intégration des commentaires liés aux éléments concernés.

RÉALISATION

Le groupement d'armaturiers, composé des entreprises Samt et Welbond Armatures, joue également un rôle majeur, tant les formes géométriques de l'ouvrage sont diverses et complexes (figures 13 à 15).

Ainsi, une aire de préfabrication d'environ 2,5 ha, composée de 2 grues à tours sur rail et 2 grues mobiles à chenille, permet d'installer les 30 gabarits et les zones de stockages des pièces. Conçus par le groupement d'armaturiers, ces gabarits permettent d'intégrer les différents inserts présents dans l'ouvrage. De quelques fagots de barres, de fines "tranches" de cône ou de cylindre d'environ 8 t sont fabriquées. Pour assurer la connexion entre les éléments, les recouvrements par éclissage sont insérés dans les cages et ne nécessitent pas d'approvisionnement par la grue une fois en place. ▷



16

© BOUYGUES-TP

Dans certaines zones, l'épinglage des recouvrements est assuré par des épingles en T-bars, le diamètre de cintrage et l'écartement des barres ne permettant pas la pose d'épingles "standards".

Les cages sont produites à plat, stockées puis transportées sur des gabarits pour éviter leur déformation. Le retournement se fait au pied de l'ouvrage, au moment de la pose.

Grâce au travail de concert entre les bureaux d'étude structure et armature, les aciers du top ring sont également préfabriqués.

La forme du top ring, composé de 3 goussets pour le levage, a naturellement conduit à un découpage en tiers. Une partie non négligeable du poids étant formée du gabarit, des barres d'ancrage de l'éolienne et des barres de levage, il a fallu optimiser le poids des armatures.

Chaque tiers représente une dizaine de tonnes d'armatures, positionnées avec une grande précision puisque chaque tiers doit s'insérer dans les attentes positionnées dans la dernière levée de fut (figure 16).

ÉQUIPEMENTS

BOAT LANDING

Chaque fondation est équipée d'un boat landing : structure métallique permettant l'accostage des navires et l'accès à la plateforme externe par une échelle. Ces structures, de près de 20 m de hauteur, sont conçues pour les spécificités du Parc et les contraintes liées à la construction :

- Le marnage de 8 m ainsi que la hauteur de vague maximum pour l'opération d'accostage (2 m) ;
- Les efforts d'impact de navire spécifiés par le client :
 - 300 kN en condition extrême d'utilisation
 - 1 000 kN en cas accidentel/perde de contrôle du navire ;
- Une durée de vie de 30 ans en milieu marin très corrosif qui a conduit au choix du matériau inconel Alloy686, hautement résistant à la corrosion, pour les boulons des brides en zone de marnage. Des tests de vieillissement en laboratoire ont été réalisés afin de valider la résistance à la corrosion et le maintien de la prétention dans le temps ;
- Le poids de la structure à lever, avec une capacité des grues à tour de 22 t ;
- Les systèmes d'accroche à la GBS de type connexion boulonnée.



17 © BOUYGUES-TP

J-TUBE

Les câbles électriques "moyenne tension" reliant les GBS entre elles et les GBS à la station électrique du Parc sont routés depuis la base de la GBS jusqu'à la plateforme interne par des J-tubes métalliques. Ces derniers sont, en partie basse, noyés dans le béton formant des bossages et, en partie haute, installés

17- Plateforme interne.
18- Photogrammétrie.

17- Internal platform.
18- Photogrammetry.

en aérien. Ils permettent l'installation des câbles électriques par tirage depuis la GBS. Le béton permet la protection des câbles pendant la phase de ballastage.

PLATEFORME INTERNE

La plateforme interne (figure 17) est composée de 3 niveaux en caillebotis sur une hauteur totale d'environ 10 m. C'est le cœur de l'interface entre l'éolienne et les câbles sous-marins. Elle est équipée de tous les systèmes électriques et d'instrumentation nécessaires au fonctionnement de l'éolienne et de la plateforme de précontrainte des boulons d'ancrage de l'éolienne.

Les plateformes internes sont métalliques, préfabriquées en deux parties, et reposent sur un corbeau en béton. Elles sont recouvertes par une structure métallique assurant leur étanchéité.

ANCRAGE DE L'ÉOLIENNE

La fixation de l'éolienne à la fondation en béton est assurée par la mise en place de 2x54 tiges M56 précontraintes, de 2,50 m de long, ancrées sur une plaque métallique noyée dans le béton. Le dimensionnement de ces tiges nécessite des études itératives menées en concertation avec le turbiniériste et l'entreprise de génie-civil, sous le pilotage du Parc éolien en mer de Fécamp. La mise en tension des tiges fournies par le génie-civiliste sera faite en mer par le turbiniériste. Il s'agit donc d'un point très sensible en matière de design et de responsabilité.

L'autre point de sensibilité majeur concerne les tolérances de pose de ces tiges qui impactent aussi leur calcul, les dimensions de la T-flange et des éléments d'assemblage.



18

© BOUYGUES-TP

Pour le génie-civiliste, il s'agit, pour un ouvrage de 50 m de hauteur et de presque 5 000 t, de positionner les 108 tiges M56 dans les réservations aménagées dans le pied de la tour, de diamètre 74 mm, avec une précision de +/- 11 mm en altimétrie et +/- 2 mm en planimétrie.

19- Vue finale du béton d'une GBS.

19- Final view of the concrete of a GBS.



Pour gérer la légère inclinaison possible des tiges, l'utilisation d'écrous et rondelles à portée sphérique a été systématisée.

Pour respecter les tolérances qui sont un enjeu majeur du projet, des gabarits spécialement conçus par le service méthodes/production du chantier se

posent au moyen de pieds de réglage sur le coffrage.

Un relevé photogrammétrique (figure 18) des tiges permet de donner l'accord avant bétonnage, puis un nouveau relevé est effectué après bétonnage et transmis aux équipes du Parc éolien en mer de Fécamp. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

SURFACE D'INSTALLATION : 28 ha

BÉTON : 121 300 m³

ACIER : 32 000 t

PRÉCONTRAINTÉ : 1 600 t

BARRES DE LEVAGE : 520 t / 4 032 u

BARRES DE FIXATION DE L'ÉOLIENNE : 350 t / 7 776 u

LONGRINES : 3 480 m

NOMBRE DE GRUES : 16 grues MR608 à flèche relevable + 2 grues MDT 349

BALLAST : 185 000 m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : Parc éolien en mer de Fécamp

CERTIFICATION : Dnvgl, Bureau Véritas, Loc

BSB : Bouygues Travaux Publics (mandataire), Saipem, Boskalis

PRINCIPAUX BUREAUX D'ÉTUDES : Bouygues Travaux Publics, Saipem, Sofresid, Windglaz, Cathie Associates

FABRIQUANT COFFRAGE : Ersem - Coffrage &quipage - Cirm

ARMATUREIERS : groupement Samt-Welbond

FOURNITURE BÉTON : LafargeHolcim

PRÉCONTRAINTÉ : Vsl France

BOAT LANDING ET PLATEFORME INTERNE : Intermare Sarda

PEINTURE : Lassarat

ÉLECTRICITÉ : Spie Oil and Gas Services

PRÉPARATION DE PLATEFORME : Colas

ABSTRACT

GRAVITY-BASE FOUNDATIONS OF THE FÉCAMP OFFSHORE WIND FARM, AN OPEN-AIR PRODUCTION PLANT

JEAN-LUC BOUCHET, BOUYGUES TP - ANTOINE AFETTOUCHE, BOUYGUES TP - JEAN-CLAUDE GANDOLFINI, BOUYGUES TP - THAÏS FOUCAULT, BOUYGUES TP - EMMANUELLE PAYER, SAIPEM

These are the 71 first gravity-base foundations for French wind turbines. This project represents the materialisation of the second offshore wind farm in France, and the first with gravity-base foundations. Given the scale of the project, to be carried out in a very short time frame, the project had to be organised like an automotive production line. The takt time expresses the time in which each task must be completed. Such a construction method is novel on this scale, and it was put in place right at the start of the Covid-19 pandemic. Other novel features are the method for offshore laying of the foundation weighing nearly 5,000 tonnes, from the surface using the Saipem 7000 barge, and the undersea hydraulic ballasting method. □

LOS CIMIENTOS POR GRAVEDAD DEL PARQUE EÓLICO OFF-SHORE DE FÉCAMP, UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN A CIELO ABIERTO

JEAN-LUC BOUCHET, BOUYGUES TP - ANTOINE AFETTOUCHE, BOUYGUES TP - JEAN-CLAUDE GANDOLFINI, BOUYGUES TP - THAÏS FOUCAULT, BOUYGUES TP - EMMANUELLE PAYER, SAIPEM

Se trata de los 71 primeros cimientos por gravedad para turbinas eólicas francesas. Este proyecto representa la materialización del 2º parque eólico off-shore en Francia, y el primero con cimientos por gravedad. La envergadura del proyecto, con un plazo de realización muy corto, ha exigido una organización temporal similar a la de una cadena de montaje de automóviles, donde la cadencia determina el ritmo constante de cada tarea. A esta escala, se trata de un modo de construcción inédito, que tuvo que orquestarse en pleno período de inicio de la epidemia de COVID. Igualmente novedosos fueron los métodos de instalación en el mar de los cimientos, de casi 5.000 t, de forma vertical mediante la grúa marina Saipem 7000, así como el método de lastrado hidráulico submarino. □



1
© TVA

LA RÉPARATION DE BOONE DAM : LE SUCCÈS D'UNE COLLABORATION FACE À UN PROJET EXIGEANT ET COMPLEXE

AUTEUR : ROMAIN BRIEU, PROJECT MANAGER, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL ET NICHOLSON CONSTRUCTION (FILIALE AMÉRICAINE DE SOLETANCHE BACHY), EN GROUPEMENT AVEC TREVIICOS, ONT RÉALISÉ, ENTRE 2018 ET 2021, POUR LE COMPTE DE LA TENNESSEE VALLEY AUTHORITY (TVA), UNE COUPURE ÉTANCHE DE 300 m DE LONGUEUR ET D'UNE PROFONDEUR MAXIMALE DE 53 m, DANS DU ROCHER ALLANT JUSQU'À 310 MPA DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION, DANS LE CADRE DU PROJET " BOONE DAM REMEDIATION ". CE NOUVEAU PROJET DE RÉHABILITATION DE BARRAGES EN AMÉRIQUE DU NORD A PERMIS D'ÉLIMINER LES PERCOLATIONS D'EAU À TRAVERS LA STRUCTURE DU BARRAGE ET LE PHÉNOMÈNE D'ÉROSION RÉGRESSIVE.

UN VIEUX BARRAGE SITUÉ EN AMONT DE PLUSIEURS VILLES MOYENNES, BARRAGES ET CENTRALES ÉLECTRIQUES

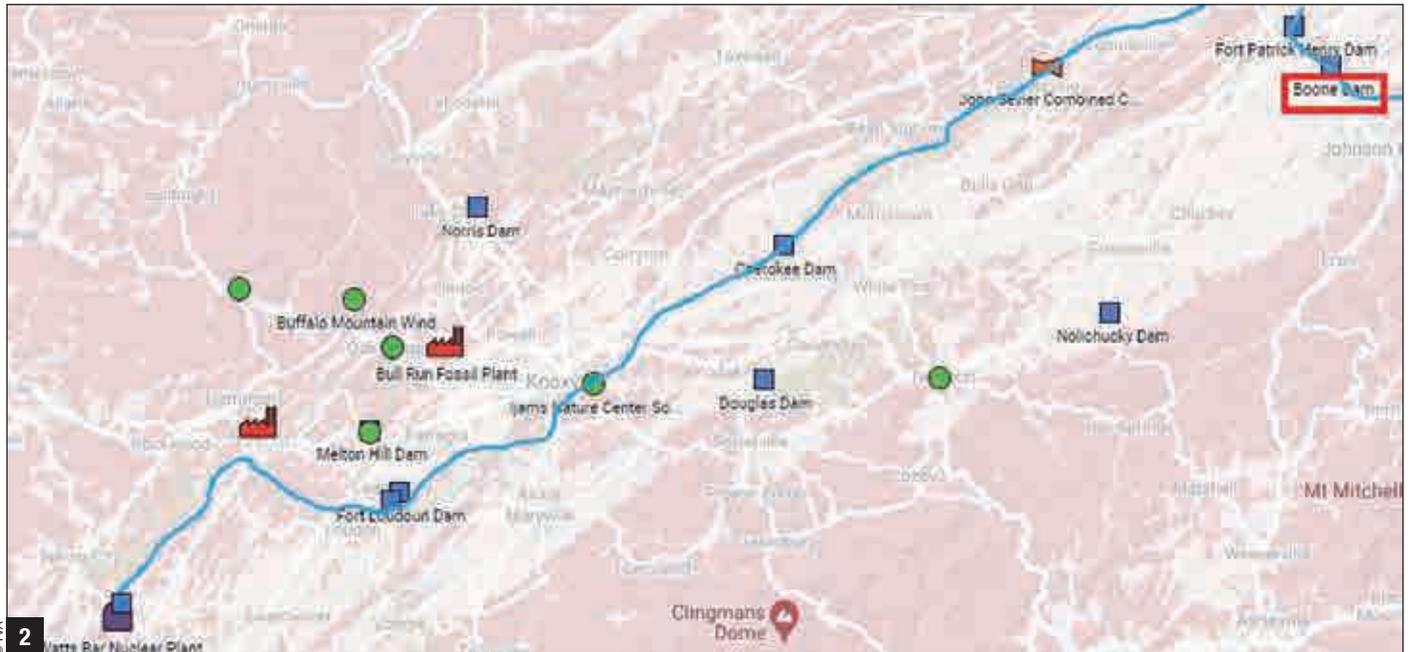
Le barrage de Boone est situé entre les villes de Johnson City et Kingsport, dans l'état du Tennessee. Il a été

construit dans une vallée de jonction entre les rivières South Fork Holston et Watauga. Il appartient à la Tennessee Valley Authority (TVA) qui l'exploite : il s'agit d'une entité privée, mais dirigée par le gouvernement fédéral des États-Unis.

1- Vue
du barrage.

1- View
of the dam.

Le barrage de Boone a été construit entre 1950 et 1952 et fait partie d'une série d'ouvrages dans la vallée de la rivière South Fork Holston qui fournissent de l'énergie hydroélectrique, un contrôle des inondations et des zones de loisir. Suivant la forte industrialisation



© TVA

2

de la zone et grâce aux ressources en charbon de la région, TVA a construit, au fil des années, plusieurs centrales électriques de plus grande capacité dans la vallée, dont une centrale à charbon proche du barrage et une centrale nucléaire plus éloignée. Les deux ouvrages sont situés en aval du barrage de Boone (figure 2).

Le barrage est composé de deux structures principales : un barrage poids en béton traversant le lit d'origine de la rivière et une digue en terre reliée à la culée rive droite à l'est (figure 3). La section en béton est fondée directement sur le substrat rocheux calcaire, tandis que la digue a été construite sur des sols résiduels et alluvionnaires. Les sols résiduels sont généralement des argiles plastiques, avec des quantités variables de limon, de sable et de

2- Situation générale du projet.

3- Vue aérienne du barrage de Boone.

2- General location of the project.

3- Aerial view of Boone Dam.

gravier. Les dépôts alluvionnaires, qui peuvent être trouvés au-dessus des sols résiduels, ainsi qu'à l'intérieur des éléments karstiques, contiennent également des galets de grès et de quartzite. Le socle rocheux, situé sous la couche de fondation, présente une surface très irrégulière caractérisée par des

pinacles rocheux, avec des fractures intermédiaires remplies de matériaux alluvionnaires ou se distinguant par des caractéristiques karstiques.

En octobre 2014, un fontis a été découvert en aval de la digue en terre du barrage (voir l'emplacement des observations en figure 3). Après quelques jours, le fontis s'est étendu rapidement et s'est effondré. À cette période, le personnel de TVA a observé un écoulement boueux et trouble dans la rivière, prouvant une circulation de fines à l'intérieur de la digue, et donc un risque de tassement et, à plus long terme, la ruine de l'ouvrage.

Pour des raisons de sécurité liées à la stabilité du barrage, plusieurs mesures provisoires de réduction des risques ont été immédiatement mises en œuvre pour se protéger de la rupture

progressive de l'ouvrage. Ces mesures comprenaient l'abaissement du niveau du réservoir en amont, le lancement d'un programme de surveillance et de suivi, la mise en œuvre d'un programme d'études géotechniques et la construction d'un filtre gradué pour limiter les pertes de fines observées dans la rivière.

La figure 4 montre la simulation des écoulements sous le barrage dans les terrains karstiques.

UN DESIGN ET UNE METHODOLOGIE ADAPTÉS À DES CONDITIONS EXTRÊMES

Rapidement, TVA et ses consultants se dirigent vers une solution de coupure étanche typique des réparations de barrages réalisées aux États-Unis par l'US Army Corps of Engineers (USACE). Cependant les conditions géologiques particulières de ce projet imposent :

- Une phase initiale d'injection et de tests ;
- Une phase initiale d'étude de la coupure étanche impliquant des entreprises spécialisées.

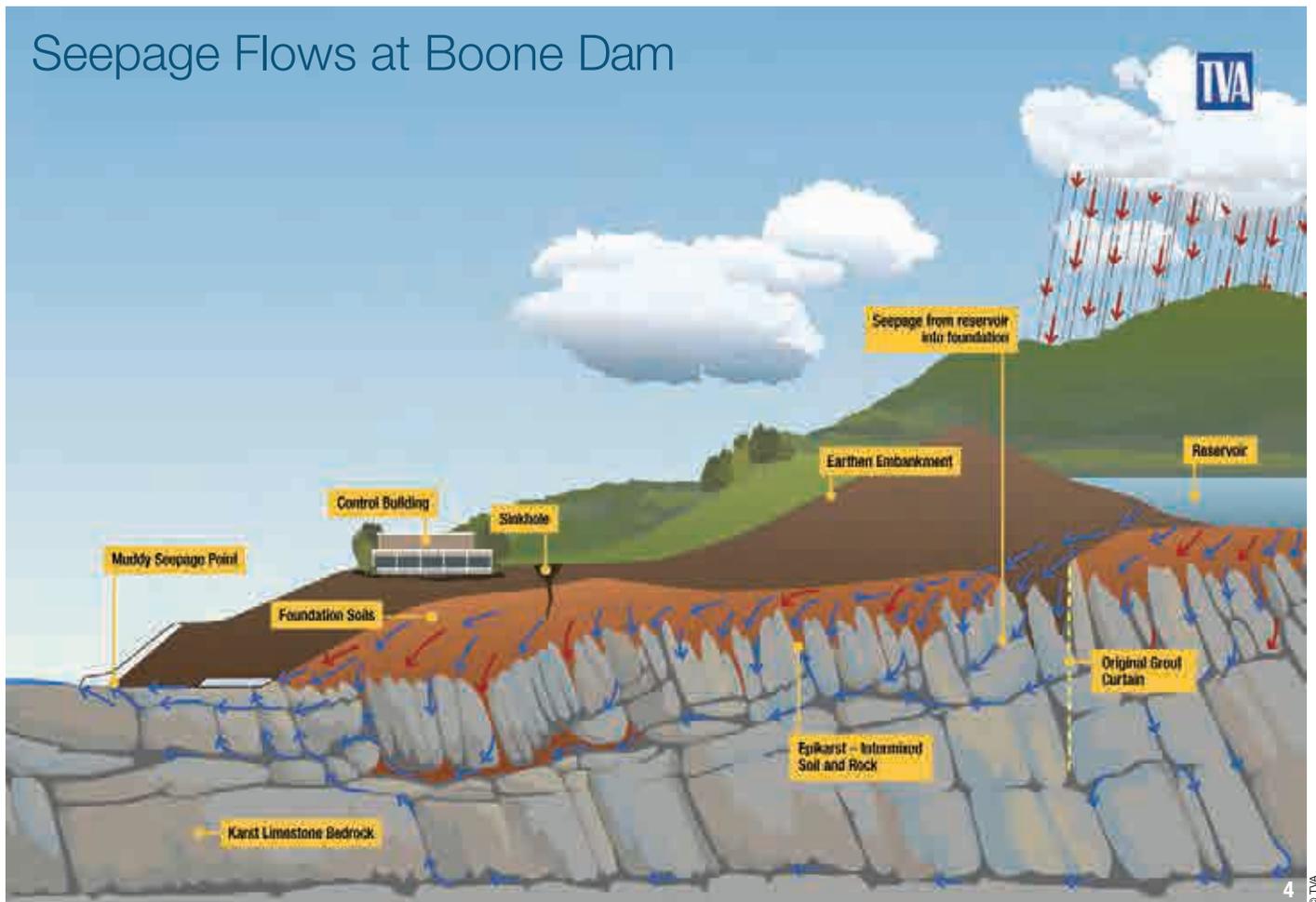
Soletanche Bachy International et Ncc (Nicholson Construction, filiale locale de Soletanche Bachy) ont choisi de joindre leurs forces avec celles de Treviicos (filiale américaine de Trevi Spa.) pour former l'entité TNJV et répondre à cet appel d'offres. Dans le cadre de cette étape, TNJV a dû proposer des méthodes et du matériel spécifique pour pouvoir exécuter la barrière étanche conçue par TVA (et ses consultants) : une barrière continue en béton d'au moins 24 pouces d'épaisseur. ▽



© TVA

3

Seepage Flows at Boone Dam



Les méthodes sélectionnées devaient également pouvoir répondre aux contraintes de sol (coupure à grande profondeur), aux conditions géométriques, mais surtout aux tolérances d'exécution qui permettront d'assurer le résultat prescrit pour une durée de vie de 100 ans, sans causer de dommages au barrage. Pour la connexion au barrage en béton existant, la coupure étanche devait s'étendre d'au moins 2 pieds horizontalement dans le monolithe en béton existant et avoir un recouvrement d'au moins 3 pieds en amont et en aval.

La figure 5 montre une vue en plan de l'exigence de chevauchement minimal des joints de pieux sécants nécessaires pour répondre à la définition d'une barrière continue en béton, et la figure 6 montre une représentation 3D de la paroi.

Les équipes de TNJV ont donc évalué les différentes méthodes et variantes possibles en prenant en compte les risques de construction. Une analyse complète des techniques de coupure étanche a été menée sur la base de l'expérience de l'équipe et de sa connaissance de projets similaires.

De plus, l'équipe a participé à une série d'ateliers collaboratifs sur les risques de construction : sécurité des barrages, performance de la construction et méthodes pour atténuer les risques.

Plusieurs méthodes ont été proposées, évaluées et exclues pour des raisons de sécurité ou de performances. Ce qui suit est un résumé des méthodes viables qui ont été reprises dans l'analyse de TNJV et évaluées plus en détail :

4- Simulation des écoulements.

5- Conception coupure étanche avec pieux sécants.

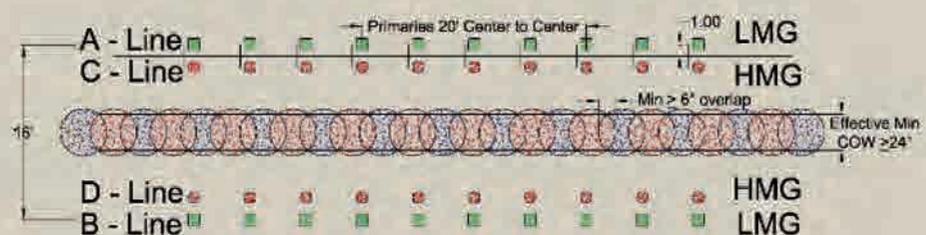
4- Flow simulation.

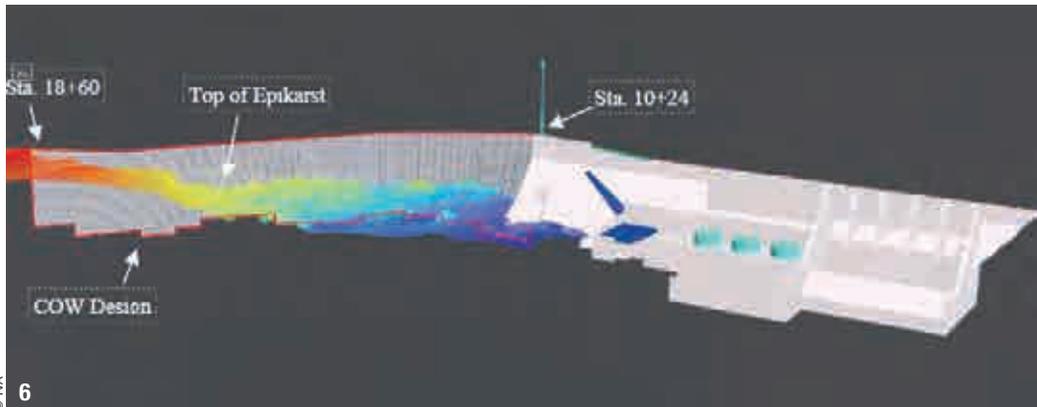
5- Cutoff design with secant piles.

→ **Option 1** : pieux sécants dans paroi moulée de protection.

Paroi moulée réalisée avec benne et Hydrofraise sous fluide de perforation à travers les sols de la digue et ancrage dans l'epikarst. Forage directionnel à travers la paroi moulée (trou pilote), puis forage avec une foreuse à circulation inverse (RCD) à travers l'epikarst et ancrage dans le rocher sain à la profondeur de conception.

CONCEPTION COUPURE ÉTANCHE AVEC PIEUX SÉCANTS





6

→ **Option 2** : méthode par panneaux.

Excavation sous fluide de perforation à travers les sols de la digue, puis la roche avec benne, trépan et Hydrofraise jusqu'à la profondeur de conception.

→ **Option 3** : pieux sécants avec installation d'un tubage acier temporaire dans le remblai.

Excavation à travers le remblai avec forage à la tarière, benne et trépan à l'intérieur d'un tubage temporaire en acier (installé jusqu'au sommet de l'epikarst), puis RCD sous fluide de perforation jusqu'à l'ancrage dans le rocher sain à la profondeur de conception.

→ **Option 4** : pieux sécants avec installation d'un tubage temporaire en acier jusqu'au rocher sain. Excavation à travers le remblai et jusqu'à l'epikarst à la tarière, benne

6- Modèle 3D du barrage de Boone avec la coupure étanche.

7- Séquence simplifiée des pieux sécants avec installation tubage acier temporaire.

6- 3D model of Boone Dam with the cutoff.

7- Simplified sequence of secant piles with installation of temporary steel tubing.

et trépan à l'intérieur du tubage temporaire en acier, puis RCD jusqu'à la roche saine à la profondeur de conception.

La matrice des risques de construction donnait la priorité à la sécurité du barrage, mais permettait également l'analyse d'aspects supplémentaires, comme la sécurité des travailleurs, l'environnement, la complexité technique, la conformité des performances, le coût et le calendrier. À partir de cette évaluation, il a été conclu que les quatre méthodes satisfaisaient les exigences minimales pour être considérées comme réalisables d'un point de vue technique. Cependant, les options 3 et 4 ont reçu respectivement les scores les plus élevés. Par conséquent, TNJV a sélectionné l'option 3 comme technique préférée et l'option 4 comme approche alternative. Voici un résumé des raisons

du choix des options 3 et 4 comme approche de construction principale et alternative :

→ **Option 1** : pieux sécants dans paroi moulée de protection.

L'énorme avantage de cette approche est qu'elle a été utilisée en toute sécurité dans des conditions géologiques et logistiques similaires. Mais le plus grand inconvénient est le délai nécessaire pour effectuer les travaux auxiliaires de la paroi de protection (en intégrant sa très grande épaisseur et les sujets techniques à l'interface avec l'epikarst). Elle n'a donc pas été sélectionnée pour la zone test.

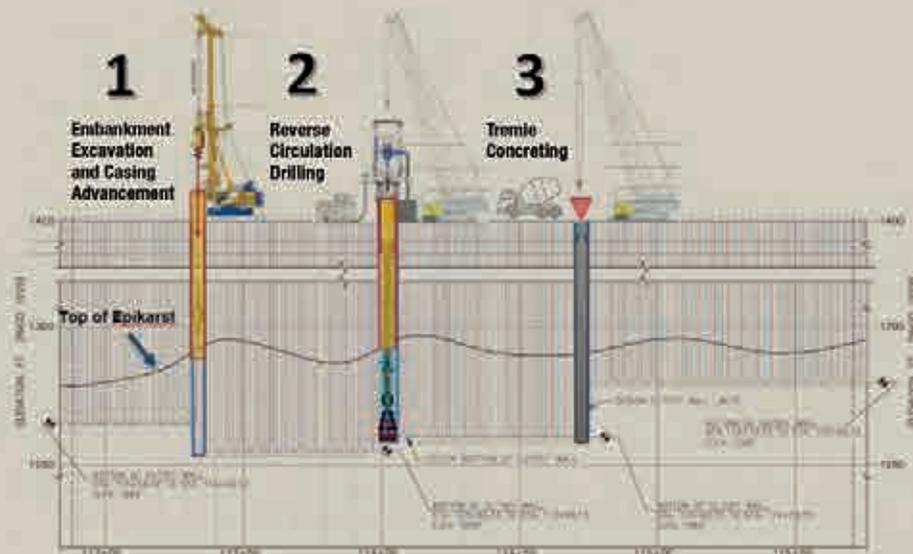
→ **Option 2** : méthode par panneaux.

Les différents pendages et les résistances élevées de l'epikarst et de la roche saine impliquaient de fortes incertitudes, telles que la capacité de l'Hydrofraise à excaver efficacement et verticalement dans ces conditions ou le temps que cette excavation prendrait pour réaliser un seul panneau. Avec le risque d'exposer longuement la digue et l'epikarst aux circulations de fluides de perforation ! Une approche de construction similaire a été couronnée de succès dans d'autres projets, mais beaucoup moins difficiles d'un point de vue géologique. Par conséquent, elle n'a pas été sélectionnée pour la zone test.

→ **Option 3** : pieux sécants avec installation d'un tubage temporaire en acier dans le remblai.

Dans cette évaluation, la méthode des pieux sécants avec tubage installé jusqu'au sommet de l'epikarst fournit une protection active du barrage pendant la construction, une méthode éprouvée capable de satisfaire les exigences du contrat. Il y a plus de flexibilité pour le déploiement des ressources, car plusieurs forages peuvent être démarrés dans le remblai dans des conditions parfaitement sûres. TNJV a choisi cette option comme approche préférée pour la construction de la coupure étanche. La figure 7 montre le schéma simplifié illustrant la séquence générale de construction des pieux sécants. L'étape 1 montre l'outillage de pieux excavant tout en plaçant un tubage en acier jusqu'au sommet de l'epikarst. L'étape 2 montre le RCD faisant avancer l'excavation à travers l'epikarst et le substratum rocheux. L'étape 3 montre le bétonnage du pieu sécant.

SÉQUENCE SIMPLIFIÉE DES PIEUX SÉCANTS AVEC INSTALLATION TUBAGE ACIER TEMPORAIRE



7

→ **Option 4** : pieux sécants avec installation d'un tubage temporaire en acier jusqu'au rocher sain.

La méthode des pieux sécants avec tubage temporaire avancé jusqu'au sommet du rocher sain protégera le remblai pendant le forage dans la roche. TNJV a sélectionné cette option comme approche de construction alternative pour la coupure étanche.

LA CONFIRMATION DE LA MÉTHODOLOGIE PAR UNE ZONE TEST

La séquence globale de construction de la coupure étanche a commencé par la zone test, où TNJV a construit une partie de la coupure étanche avec quatre méthodes de construction différentes pour démontrer que les méthodes proposées répondaient aux exigences du projet. Dans la zone test, TNJV a testé la méthode de construction principale (option 3 citée au-dessus) et la méthode alternative (option 4 citée au-dessus) et les méthodes Right Rim (RRCA) et Tie-In (TICA) qui correspondent aux techniques utilisées pour les connections aux deux extrémités de la digue (côté barrage béton et côté terrain naturel avec un toit rocheux très haut) :

→ L'approche de construction primaire est définie comme la construction de pieux sécants avec l'installation d'un tubage temporaire en acier dans le remblai et l'assise au sommet de l'epikarst (option 3 de l'étude).

→ L'approche de construction alternative est définie comme la construction de pieux sécants avec l'installation d'un tubage temporaire en acier dans l'epikarst (option 4 de l'étude).

→ L'approche de construction en bordure droite (RRCA) est définie comme la construction de pieux sécants par l'utilisation de trous pilotes pour guider les outils de forage. La méthode est la suivante : forage Hi'Drill à travers les remblais superficiels et ancrage dans l'epikarst, scellement d'un tube PVC, forage directionnel d'un trou à travers le tube PVC et dans le rocher sain jusqu'à la profondeur de conception de la coupure étanche, réalésage du trou pilote à la tarière pour les remblais, puis RCD dans le rocher sain jusqu'à la profondeur de conception. Cette méthode a été ajoutée pour répondre aux conditions particulières du toit rocheux à la jonction avec le terrain naturel.



→ L'approche de construction de raccordement (TICA) est définie comme l'excavation sous fluide de perforation d'un panneau rectangulaire dans le remblai adjacent au barrage en béton, à l'aide d'une benne preneuse et son remplissage avec du béton. Il s'agit ensuite de perforer des trous directionnels dans le béton du panneau, puis

8- Vue du projet durant la phase test.

9- Carottage de contrôle.

8- View of the project during the test phase.
9- Control core sampling.

dans le rocher sain jusqu'à la profondeur de conception de la coupure étanche. Et enfin de terminer l'excavation des pieux, par alésage à travers le béton avec la machine à pieux, puis avec le RCD jusqu'à la profondeur de conception.

Ces essais (figure 8) ont permis de confirmer l'ensemble des méthodes de construction proposées, mais également de tester les méthodes de contrôle. Le contrat imposait en particulier des contrôles par carottage des pieux et des joints (vérification des tolérances de verticalité - figure 9).

À la suite des essais, les travaux ont duré 20 mois et ont mis en œuvre 3 foreuses de pieux traditionnelles, 3 ateliers RCD (figures 10 et 11), un outillage de paroi moulée et 3 foreuses en petit diamètre (forage Hi'drill, perforation dirigée et carottage).

LE DÉFI DES JOINTS

Les pieux primaires ont été installés en suivant la séquence générale décrite précédemment, les étapes supplémentaires comprenaient en particulier la réalisation de relevés de verticalité, avec l'utilisation de 3 méthodes : SAAscan, inclinomètre et Koden.

La séquence globale de construction des pieux secondaires est très similaire à celle des pieux primaires. Les trois principales différences sont :





10
© TVA

- Lors de l'excavation, le remplacement du fluide de perforation est plus fréquent pour maintenir ses propriétés en raison de la pollution de la boue par le ciment des pieux primaires.
- L'extraction du tubage provisoire se fait après l'achèvement du forage et après la substitution finale du fluide de forage (stabilité de l'ex-

10- Vue du projet durant phase travaux.
11- Atelier de forage à circulation inverse (RCD).

10- View of the project during the works phase.
11- Reverse circulation drilling (RCD) rig.

- cavation reposant sur la boue d'excavation).
- Avant la mise en place du béton, les joints des éléments secondaires sont nettoyés à l'aide d'un outil de brossage (figure 12).

Sur la base d'essais réalisés dans la zone technique, une brosse en acier a été choisie pour nettoyer la section tubée du pieu à travers le remblai

(matériau cohésif) une brosse en polypropylène a été sélectionnée pour la section non tubée dans le substrat rocheux.

UNE RÉALISATION REMARQUABLE EN TERMES DE QUALITÉ, SÉCURITÉ ET D'ENVIRONNEMENT

Avec seulement 3 pieux tertiaires (soit moins de 1 % du nombre total de pieux) réalisés pour des raisons de coupure étanche non conforme (déviations trop élevées), plus de 1 an de travail sans aucun accident (avec ou sans arrêt), les efforts de l'ensemble des équipes qui ont participé à ce projet d'envergure ont été récompensés par ce grand succès technique et humain. Par ailleurs, l'environnement a été largement pris en compte. Une installation dédiée au traitement des eaux a été construite et utilisée pour gérer toutes les eaux de ruissellement et de production avant rejet dans le cours d'eau en aval du barrage. De même, la confection d'un béton utilisant les laitiers des centrales de TVA a permis de mettre en œuvre un béton bas carbone. Un nombre important de résidents vivant à proximité du barrage, des mesures de réduction du bruit ont été prises, comprenant notamment la construction d'un mur anti-bruit de 10 m de haut.



© TVA 11



12 © TVA



13 © TVA

12- Techniques utilisées pour le brossage des joints.

13- Dons de l'équipe du projet à une association caritative locale.

12- Techniques used for joint brushing.

13- Project team's gifts to a local charity organisation.

Pour garantir que la pollution sonore reste dans les limites de la réglementation locale, un système de stations de surveillance sonore et d'enregistrement a été mis en place autour du chantier avec des niveaux d'alerte.

Enfin, l'équipe du projet a été fière de soutenir chaque année Second Harvest, une banque alimentaire locale desservant la région de l'est du Tennessee et Toys for Tots, en collaboration avec le Corps des Marines des États-Unis, offrant des cadeaux de Noël aux enfants défavorisés (figure 13). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- Montant du marché : 90 M€
- 10 600 m² de coupure étanche en différents types de pieux sécants
- 5 000 m² de coupure dans le remblai du barrage
- 5 600 m² de coupure étanche dans un rocher de résistance moyenne de 160 MPa
- 23 000 m³ de béton fabriqué sur place
- 700 m de forage Hi'Drill
- 2 500 m de forage directionnel
- 1 700 m de carottage de contrôle
- 16 mois consécutifs sans accidents (avec ou sans arrêt)

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Tennessee Valley Authority (TVA)

MAÎTRE D'ŒUVRE : Tennessee Valley Authority (TVA)

CONSULTANTS : Aecom, Black & Veatch, Geosyntec Consultants, Stantec, S&ME

ENTREPRISE GÉNÉRALE : NCC (Soletanche Bachy International et implantation locale) & Treviicos joint venture

BUREAU DES MÉTHODES / APPUI CONCEPTION : Soletanche Bachy International et Trevi Spa, Barr Engineering

ABSTRACT

REPAIR OF BOONE DAM: SUCCESSFUL COLLABORATION ON A DEMANDING, COMPLEX PROJECT

ROMAIN BRIEU, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Between 2018 and 2021, as part of the Boone Dam Remediation project for the Tennessee Valley Authority (TVA), Soletanche Bachy International and Nicholson Construction (Soletanche Bachy's US subsidiary), in a consortium with Treviicos, executed a cutoff 300 metres long and of maximum depth 53 metres, in rock having a compressive strength of up to 310 Mpa. This new dam remediation project in North America was able to eliminate water seepage through the dam structure, and the phenomenon of headward erosion. □

LA REPARACIÓN DEL BOONE DAM: EL ÉXITO DE UNA COLABORACIÓN EN UN PROYECTO EXIGENTE Y COMPLEJO

ROMAIN BRIEU, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL

Soletanche Bachy International y Nicholson Construction (filial americana de Soletanche Bachy), en consorcio con Treviicos, realizaron, entre 2018 y 2021, en el marco del proyecto Boone Dam Remediation, por cuenta de la Tennessee Valley Authority (TVA), un corte estanco de 300 m de longitud y de una profundidad máxima de 53 m en un peñasco con una resistencia a la compresión de hasta 310 Mpa. Este nuevo proyecto de rehabilitación de presas en Norteamérica ha permitido eliminar las percolaciones de agua a través de la estructura de la presa y el fenómeno de erosión regresiva. □

PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€

TRAVAUX
MAINTENANCE DES INFRASTRUCTURES

960

TRAVAUX
TRAVAUX SOUTERRAINS

961

TRAVAUX
INTERNATIONAL

962

TRAVAUX
TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

963

TRAVAUX
OUVRAGES D'ART

964

TRAVAUX
SOLS ET FONDATIONS

965

TRAVAUX
SPÉCIAL GARES

966

TRAVAUX
ÉNERGIE

967

TRAVAUX
VILLE ET PATRIMOINE

968

TRAVAUX
TRAVAUX SOUTERRAINS

969

TRAVAUX
INTERNATIONAL

970

TRAVAUX
TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX

971

TRAVAUX
OUVRAGES D'ART

972

TRAVAUX
SPÉCIAL INNOVATIONS ET TRANSITIONS

973

TRAVAUX
SOLS ET FONDATIONS

974

*Offre valable jusqu'au 30/06/22



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) :

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 960 x | <input type="checkbox"/> 965 x | <input type="checkbox"/> 970 x |
| <input type="checkbox"/> 961 x | <input type="checkbox"/> 966 x | <input type="checkbox"/> 971 x |
| <input type="checkbox"/> 962 x | <input type="checkbox"/> 967 x | <input type="checkbox"/> 972 x |
| <input type="checkbox"/> 963 x | <input type="checkbox"/> 968 x | <input type="checkbox"/> 973 x |
| <input type="checkbox"/> 964 x | <input type="checkbox"/> 969 x | <input type="checkbox"/> 974 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 30/06/22 et hors frais postaux (exemple pour un numéro : 5,00 € d'envoi France, 10,00 € 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



© AGENCE NEUVIÈME DJIBOUTI

CONCEPTION, CONSTRUCTION ET EXPLOITATION D'UNE USINE DE DESSALEMENT – DJIBOUTI

AUTEURS : ALAIN POLONI, DIRECTEUR D'EXPLOITATION, EIFFAGE GENIE CIVIL-PI - VICTOR JOB, INGENIEUR TRAVAUX, EIFFAGE GENIE CIVIL-PI - JESUS-MARIA GUZMAN LOPEZ, DIRECTEUR DE PROJET, TEDAGUA - NORBERT PIERRON, CHEF DE MISSION, CABINET MERLIN

LE PROJET DE CONCEPTION, CONSTRUCTION ET EXPLOITATION D'UNE USINE DE DESSALEMENT À DORALEH (DJIBOUTI) EST DESTINÉ À AMÉLIORER LES CONDITIONS D'ACCÈS À L'EAU POTABLE DE LA POPULATION DE DJIBOUTI. LA COMPLEXITÉ DE CE CHANTIER CLÉ EN MAIN A NÉCESSITÉ DE LA PART DES ENTREPRISES EIFFAGE GÉNIE CIVIL ET TEDAGUA UNE PARFAITE MAÎTRISE DES DIFFÉRENTS MÉTIERS DE LA CONSTRUCTION ET DES TRAVAUX MARITIMES AINSI QUE DU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT D'EAU DE MER PAR OSMOSE INVERSE. CETTE USINE DE DESSALEMENT, SITUÉ SUR LA COMMUNE DE DORALEH, EST UNE PREMIÈRE NON SEULEMENT POUR LA RÉPUBLIQUE DE DJIBOUTI MAIS ÉGALEMENT POUR TOUTE LA SOUS-RÉGION.

PRÉSENTATION DU PROJET LE PROJET

Le projet de conception, construction et exploitation pendant 5 ans de l'usine de dessalement de Doraleh est structurant pour le développement de la République de Djibouti. Les travaux prévus au marché, réalisés dans le

cadre d'un groupement, comprennent la construction d'une unité de dessalement de l'eau de mer d'une capacité de traitement de 22 500 m³/jour, représentant environ 30% de la consommation d'eau journalière de la ville de Djibouti. Un réservoir de stockage de l'eau traitée de 2 000 m³ installé sur le site

1- Vue aérienne générale.

1- General aerial view.

de l'usine, une conduite de 9,43 km alimentant un second réservoir de 5 000 m³ raccordé au réseau de distribution d'eau de la ville de Djibouti ainsi que des canalisations en PEHD pour le captage et le rejet en mer de la saumure, viennent compléter l'aménagement.



Le procédé de traitement de l'eau de mer choisi est le procédé par osmose inverse, qui consiste à séparer l'eau et les sels dissous au moyen de membranes polymères semi-perméables sous l'action d'une pression de 60 bars. Les ouvrages de l'usine ont été dimensionnés pour permettre, à terme, de doubler sa capacité de production à 45 000 m³/jour.

L'usine de Doraleh, construite à l'extérieur de la capitale Djibouti Ville, entre la nouvelle base militaire chinoise et le port de Doraleh Multi-Purpose Port, contribuera à assurer l'indépendance hydrique du pays, qui est aujourd'hui fortement dépendant de l'eau fournie par l'Éthiopie.

2- Image 3D.

3- Vue aérienne de la canalisation en mer.

2- 3D picture.

3- Aerial view of the offshore piping.

Le projet est financé en majeure partie par un don de l'Union Européenne et par le gouvernement de la République de Djibouti. Il est placé sous la maîtrise d'ouvrage du ministère de l'Économie et des Finances chargé de l'Industrie de Djibouti et sous la maî-

trise d'ouvrage déléguée du ministère de l'Agriculture, de la pêche, de l'élevage et des ressources halieutiques de Djibouti.

L'Office national de l'eau et de l'assainissement de Djibouti (ONEAD) assurant la maîtrise d'œuvre et le Cabinet Merlin (France) la maîtrise d'œuvre déléguée.

À la fin de la phase d'exploitation de l'usine de Doraleh par le Groupement Eiffage Génie Civil – Tedagua, c'est l'ONEAD qui en assurera la gestion.

LES DIFFÉRENTES TRANCHES DE TRAVAUX

Le chantier comprend plusieurs tranches de travaux.

Tranche 1 :

Construction clé en main de l'usine de dessalement, composée de 16 bâtiments en béton armé avec charpente métallique et bardage/toiture en panneaux sandwichs protégé par une peinture classe C5 ainsi qu'un réservoir en acier vitrifié de stockage de 2 000 m³. Aux bâtiments destinés à la production d'eau potable s'ajoute un bâtiment d'exploitation équipé d'un laboratoire et d'une salle de contrôle avec son système SCADA permettant de faire fonctionner l'usine en mode totalement automatique (figure 2).

Tranche 2 :

Réalisation d'une conduite de captage d'eau de mer Ø 1 400 mm, de longueur 410 m avec sa tour de prise et d'une conduite de rejet de la saumure Ø 800 mm, de longueur 750 m. Les conduites de captage et de rejet sont en Polyéthylène Haute Densité (PEHD), elles sont soudées par le processus bout à bout et la tour de prise est en Polyester Renforcé de Fibre de Verre (PRV) (figure 3).

En raison d'une emprise limitée et afin de faciliter le transport des conduites de captage et de rejet, celles-ci ont été acheminées puis soudées sur le port de la Société Djiboutienne de gestion du Terminal Vraquier (SDTV) à Djibouti pour ensuite être transportées par flottage à l'aide de remorqueurs jusqu'à leur point d'immersion (figure 4).

Le marché prévoyait que la tour de prise serait réalisée en béton armé et le groupement a proposé une solution variante en PRV afin d'améliorer la longévité en milieu marin de cette structure tout en facilitant sa mise en œuvre grâce à un gain de poids considérable (figure 5).

Tranche 3 :

Construction d'une conduite de transfert en PRV Ø 700 mm sur 9,43 km et des chambres de vannes (sectionnement, ventouses et purges) toutes équipées avec des accessoires en fonte revêtue. Cette tranche de travaux comprend aussi la construction d'un réservoir de 5 000 m³ situé à Balbala (quartier le plus haut de la ville de Djibouti) servant de réservoir tampon et alimentant par gravité le réseau d'alimentation en eau potable de la ville (figure 6).

Tranche 4 :

Maintenance et exploitation de l'usine de Doraleh pendant une période de 5 ans qui inclut également la formation du personnel local de l'ONEAD, afin de permettre une utilisation et une maintenance pérennes de l'usine après le départ du groupement (figure 7).





© GROUPEMENT EIFFAGE GÉNIE CIVIL-PI & TEDAGUA



© GROUPEMENT EIFFAGE GÉNIE CIVIL-PI & TEDAGUA



© GROUPEMENT EIFFAGE GÉNIE CIVIL-PI & TEDAGUA

ENVIRONNEMENT DU PROJET

CONTRAINTES EXTÉRIEURES

La station de dessalement de Doraleh est située dans une zone contrainte entre une base militaire chinoise en construction et un bâtiment militaire japonais destiné à lutter contre la piraterie. À cela s'ajoute la présence de deux ports situés de part et d'autre de la station, celui de la base militaire chinoise et le nouveau port de commerce de Djibouti.

Les bâtiments militaires qui n'étaient pas identifiés au moment de l'appel d'offre ont nécessité de revoir l'emprise au sol des installations de l'usine et donc de réadapter la position des différents bâtiments de la tranche 1, tout en se rapprochant le plus possible de la conception de base définie avec le client.

En raison de l'activité portuaire aux abords du projet, des études de courantologie, de bathymétrie, de dissolution ainsi que l'analyse de nombreux prélèvements d'échantillons d'eau de mer ont été réalisés afin de définir la position optimale du point de captage (tour de prise) et du point de rejet de la saumure.

ENVIRONNEMENT

La bathymétrie du fond marin sur lequel doivent reposer les conduites de captage et de rejet est telle qu'une grande partie du dragage est faite sur le tombant. Ce dernier est un habitat privilégié abritant une grande diversité de la flore marine djiboutienne. Conformément aux spécifications du contrat et à la charte environnementale du groupement concernant la préservation de la faune et de la flore, une mission scientifique a été organisée par le

groupement et le cabinet Merlin. Cette mission a permis de référencer puis de déplacer 15 espèces endémiques de coraux par la technique de bouturage, technique qui consiste à prélever une partie vivante du corail et de la replanter hors de la zone impactée par les travaux. Un suivi régulier a été mis en place de manière à pouvoir suivre l'évolution des boutures et s'assurer de leur bon développement.

À l'emplacement des bâtiments de l'usine le sol est très dur (dépassant les 27 MPa de résistance) mais néanmoins très fracturé avec présence d'eau. Ces caractéristiques et notamment la forte perméabilité du sol ont été mises en évidence par une série d'essais Lugeon. À la vue des résultats obtenus il a notamment été nécessaire de revoir la conception et les méthodes

4- Installation de la tour de prise.

5- Lest béton de la canalisation en mer.

6- Installation de la canalisation de transfert.

7- Process et racks d'osmose inverse.

4- Installing the intake tower.

5- Concrete ballast for the offshore piping.

6- Installing the transfer pipeline.

7- Reverse osmosis process and racks.

de réalisation du bâtiment de captage (pompage) situé en extrême limite de la jonction terre/mer.

POINTS PARTICULIERS : TRAVAUX EN CONCEPTION - CONSTRUCTION

GÉNIE CIVIL DU BÂTIMENT DE CAPTAGE

Le bâtiment le plus complexe du projet est le bâtiment de captage (BCA). Ce bâtiment abrite le système de pompage (3 pompes de 1250 m³/h) qui permet d'envoyer l'eau de mer sous pression dans le système de préfiltration de l'usine. Ce système est positionné en pied de falaise et le niveau bas du bâtiment est situé à -6 m par rapport au niveau de la mer. Ce niveau a été déterminé en fonction de l'étude de l'historique de l'évolution des marées



© AGENCE NEUVIÈME DJIBOUTI



© GROUPEMENT EIFFAGE GÉNIE CIVIL-PI & TEGAGUA

8

et des données enregistrées in situ pendant une année. Afin de fonctionner parfaitement, le bâtiment de captage doit être immergé en permanence, et ceci quel que soit le niveau de la marée, de façon à éviter tout risque d'aspiration d'air au niveau des pompes. Pour les mêmes raisons, afin d'éviter l'effet de vortex créé par les pompes, il existe à l'intérieur de la fosse des pompes des voiles séparateurs en béton armé de 18 cm d'épaisseur, de 6,4 m de haut et de 4 m de long. Afin de renforcer ces derniers et d'ajouter une sécurité supplémentaire, leur sont intégrés des appendices triangulaires de 40 cm d'épaisseur.

Le terrassement de ce bâtiment a été réalisé à l'abri d'un batardeau métallique entièrement étanche qui a été spécialement conçu pour ces travaux. La conception et la construction de ce batardeau de 26 m x 9 m x 9,30 m de hauteur, avec son bouchon étanche en béton de 300 m³, a permis de construire le bâtiment de captage à sec en toute sécurité.

Pour les terrassements à l'intérieur du batardeau, il a été utilisé une pelle mécanique de 90 t avec un bras long équipé d'un brise roche hydraulique

8- Bétonnage du fond du batardeau.

8- Concreting the bottom of the cofferdam.

immergeable. Les déblais provenant de ces travaux ont été utilisés pour créer une plateforme de travail permettant le stockage des éléments du batardeau ainsi qu'une zone de préfabrication de lests béton pour les conduites PEHD de captage et de rejet.

Le batardeau a été utilisé comme coffrage perdu, ce qui a permis, compte tenu de sa rigidité, de réduire l'épaisseur des voiles béton de 1,35 m à 0,65 m (figure 8).

RÉSERVOIRS

Les réservoirs de stockage de 2000 m³ et 5000 m³ initialement prévus au marché étaient en structure béton. Le groupement a proposé une variante avec des réservoirs préfabriqués en acier vitrifié. Cette solution a permis de simplifier les méthodes de construction et d'éviter les problèmes d'étanchéité

au droit des reprises de bétonnage. Les parois et les dômes des réservoirs sont composés de viroles rectangulaires de 1,4 m de haut par 2,68 m de large. Ces plaques sont assez légères pour être manutentionnées sans avoir recours à une grue ou un chariot manuscopique.

Les dômes ont été d'abord montés sur le radier en béton armé puis levés à l'aide de 8 vérins hydrauliques. Les parois du réservoir de 2000 m³ ont été réalisées en 4 levés successives tandis que le réservoir de 5000 m³ en a nécessité 5. La dernière rangée de viroles en acier vitrifié est ancrée dans le radier béton et l'étanchéité entre les différents éléments est assurée par boulonnage et joint mastic (figure 9).

SERRURERIE

La quasi-totalité des garde-corps, plateformes de travail, escaliers d'accès et caillebotis a été réalisée en PRV. Cette variante, par rapport à la solution préconisée au marché (acier galvanisé), permet d'alléger drastiquement les structures.

De fait, cette solution permet aussi une installation, une logistique et une manipulation plus rapide et plus précise des

différents éléments constructifs. Les caillebotis qui ont été installés sur le projet ont une résistance à la charge de 3,05 kN/m².

Le PRV présente surtout l'avantage d'offrir une très bonne résistance en milieu marin agressif tel que celui présent à Djibouti. C'est aussi un matériau qui ne nécessite aucun entretien sur le long terme (figure 10).

PROCESS

Captage :

L'eau de mer pénètre par gravité dans le bâtiment de captage depuis la tour de prise et passe ensuite à travers un système de dégrilleurs avant d'être pompée vers le premier échelon de prétraitement. Celui-ci sert de premier niveau de filtration pour éliminer les matières et matériaux de plus grandes dimensions tels que les pierres, corail, etc.

Le pompage de l'eau est assuré par trois pompes ayant chacune un débit de 1 250 m³/h, 2 pompes fonctionnant en permanence tandis qu'une pompe reste en secours (figure 11).

Prétraitement :

Le prétraitement est effectué à l'aide de dix filtres en PRV pesant 200 t chacun. ▷

Les filtres sont disposés en deux étages : le premier étage est composé de six filtres (sable + anthracite) et le second étage est composé de quatre filtres (sable). Ces filtres servent à éliminer les plus petites matières en suspension (figure 12).

Afin d'éviter le colmatage et l'endommagement des membranes d'osmose inverse, il est prévu en sortie des filtres du prétraitement un niveau supplémentaire de filtration de l'eau à l'aide de trois filtres à cartouches.

Osmose Inverse :

Le bâtiment d'osmose inverse abrite deux racks avec une capacité nominale de 11 250 m³/jour. Ces deux racks sont composés de 138 tubes renfermant chacun 7 membranes soit un total de 1932 membranes d'osmose inverse. La pression de l'eau (60 bars) qui traverse les membranes est assurée par des pompes haute pression. Seulement 45 % de l'eau pompée en mer passe à travers les membranes et devient de l'eau dessalinisée, appelée aussi perméat. L'eau restante, qui représente 55 % du volume initial pompé, présente une forte concentration en sel (saumure), elle est renvoyée en mer par l'intermédiaire de la conduite de rejet. Un système de récupération d'énergie (ERI) et pompes booster est mis en place sur chaque rack ce qui permet d'optimiser la consommation d'énergie électrique. Il faut noter également que les membranes d'osmose inverse sont extrêmement sensibles à la présence d'hydrocarbures, même à très faible concentration. Cette présence peut très rapidement provoquer la destruction des membranes et donc un arrêt de la production d'eau potable pendant le temps nécessaire à leur remplacement. Compte tenu de la situation géographique de l'usine de Djibouti, entre deux ports dont l'activité devrait s'accroître dans les prochaines années, cet aspect a été pris en compte lors des études de conception de l'usine. Ainsi l'usine a été équipée avec trois capteurs de détection automatique des hydrocarbures qui sont situés à différents niveaux de la filière de production d'eau potable.

Post-traitement :

Le perméat est stocké dans un réservoir en béton de 12 m de haut qui permet de réaliser le processus de post-traitement en écoulement gravitaire et donc d'économiser de l'énergie électrique. Ce premier processus de post-traitement consiste à injecter du CO₂ dans le réservoir. Le perméat est ensuite dirigé vers une batterie de quatorze filtres à calcaire.



9

© AGENCE NEUVIÈME DJIBOUTI

Lors du passage de l'eau, les particules de calcaire se mélangent à l'eau pour en assurer sa reminéralisation. À ce stade l'eau peut être distribuée pour sa consommation et elle est provisoirement stockée dans le réservoir tampon de 2000 m³.

Pompage de l'eau potable :

Une station de pompage avec trois pompes d'une capacité unitaire de 450 m³/h, en fonctionnement 2+1,

9- Vue générale avec le réservoir métallique.

10- Plateforme en PRV.

9- General view with the steel tank.

10- GRP platform.

permet de pomper l'eau stockée dans le réservoir d'eau traitée dans une conduite Ø 700 mm en PRV jusqu'au réservoir de Farah-Had situé à 9,43 km de l'usine. De ce réservoir, d'une capacité de 5000 m³, l'eau est ensuite distribuée par gravité dans le réseau de canalisations de la ville de Djibouti.

Instrumentation :

Toute l'usine est automatisée grâce à la mise en place d'un Système de



10

© AGENCE NEUVIÈME DJIBOUTI



11
© AGENCE NEUVIÈME DJIBOUTI



12
© AGENCE NEUVIÈME DJIBOUTI

Contrôle et d'Acquisition de Données (SCADA) qui est situé dans la salle de contrôle du bâtiment d'exploitation. Les travaux ont été impactés par la pandémie de la Covid-19 ce qui en a affecté le déroulement en raison des mesures sanitaires mises en place par le gouvernement de Djibouti (fermeture des frontières terrestres et de l'aéroport international de Djibouti, blocage de certains ports retardant l'amené du matériel ...).

11- Prétraitement, pompage de l'eau de mer.
12- Vue aérienne des filtres à sable.

11- Seawater pretreatment and pumping.
12- Aerial view of sand filters.

CONCLUSION

Les travaux ont été impactés par la pandémie de la Covid-19 qui a retardé la mobilisation du matériel pour les travaux maritimes et la mobilisation du personnel spécialisé pour les soudures des super duplex, les essais et la mise en route de l'usine. Le super duplex est un acier inoxydable ayant une structure biphasée composée de fer et d'austénite. Le groupement a ainsi dû adapter ses méthodes de travail et mettre en

place, dès que cela a été possible, des mesures d'accélération avec des horaires étendus pour permettre de respecter le planning. Le marché comprend un délai contractuel de 39 mois de travaux et de 5 ans d'exploitation. La première pierre du projet a été posée le 18 janvier 2018 et l'inauguration de l'usine s'est déroulée le 14 mars 2021 en présence du Président de la République de Djibouti. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

EXCAVATIONS

USINE : 30 152 m³

DRAGAGE : 19 700 m³

CANALISATIONS : 64 525 m³

BÉTON DE STRUCTURE : 5 323 m³

ACIER : 660 t

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 500 t

CANALISATION PRV Ø 700 : 9,4 km

CANALISATION PEHD Ø 1 400 ET Ø 800 : 1,2 km

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministère de l'Économie et des Finances chargé de l'Industrie

MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche, de l'Élevage et des Ressources Halieutiques

MAÎTRE D'ŒUVRE : l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement de Djibouti

MAÎTRE D'ŒUVRE DÉLÉGUÉ : Cabinet Merlin

ENTREPRISE GÉNÉRALE EN GROUPEMENT :

- **GÉNIE CIVIL : Eiffage Génie Civil - Projets Internationaux**
- **PROCESS : Tedagua**

ABSTRACT

DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATION OF A DESALINATION PLANT – DJIBOUTI

ALAIN POLONI, EIFFAGE GENIE CIVIL-PI - VICTOR JOB, EIFFAGE GENIE CIVIL-PI - JESUS-MARIA GUZMAN LOPEZ, TEDAGUA - NORBERT PIERRON, CABINET MERLIN

Djibouti currently has insufficient access to potable water, hence the need for construction of a desalination plant capable of supplying 30% of the city's daily water consumption, by producing 22,500 m³ per day. This project consists of civil works, with 16 buildings of reinforced concrete with a steel frame, two vitrified steel tanks, 9.43 km of buried GRP piping, and 1.2 km of offshore HDPE piping. It also comprises the process, including pumps with a capacity of 1,250 m³/h, 200-tonne filters, 1,932 reverse osmosis membranes installed in two 138-tube racks, and 14 limescale filters. Lastly, the whole plant is controlled by a SCADA system. □

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE UNA PLANTA DESALINIZADORA – YIBUTI

ALAIN POLONI, EIFFAGE GENIE CIVIL-PI - VICTOR JOB, EIFFAGE GENIE CIVIL-PI - JESUS-MARIA GUZMAN LOPEZ, TEDAGUA - NORBERT PIERRON, CABINET MERLIN

El insuficiente acceso actual al agua potable en Yibuti ha revelado la necesidad de construir una planta desalinizadora capaz de cubrir el 30% del consumo de agua diario de la ciudad, produciendo 22.500 m³ al día. Este proyecto incluye la ingeniería civil, con 16 edificios de hormigón armado y estructura metálica, 2 depósitos metálicos de acero vitrificado, 9,43 km de tubo de PRV enterrado y 1,2 km de tubo PEHD en el mar. Asimismo, en términos de proceso, incluye bombas con una capacidad de 1.250 m³/h, filtros de 200 t, 1.932 membranas de ósmosis inversa instaladas en dos racks de 138 tubos y 14 filtros de cal. Finalmente, toda la planta está controlada por un sistema SCADA. □



1
© AIA LIFE DESIGNERS

CONCEPTION / CONSTRUCTION DU CENTRE DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE À IVRY-PARIS XIII

AUTEURS : JULIEN BOUDET, DIRECTEUR DE PROJET, VINCI ENVIRONNEMENT - RÉMI GODEFROY, DIRECTEUR DE LA CONSTRUCTION, VINCI ENVIRONNEMENT - PHILIPPE LAURENT, DIRECTEUR DES RÉALISATIONS, VINCI ENVIRONNEMENT

LE CENTRE MULTI FILIÈRE D'IVRY/PARIS XIII DU SYCTOM, SITUÉ SUR LES COMMUNES D'IVRY-SUR-SEINE ET DE PARIS TRAITE LES ORDURES MÉNAGÈRES RÉSIDUELLES DE 1,5 MILLION D'HABITANTS. EN 2015, LE SYCTOM A CONFÉ LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE CETTE NOUVELLE INFRASTRUCTURE DE TRAITEMENT AU GROUPEMENT D'ENTREPRISES IP13. C'EST LE PLUS GRAND PROJET D'INSTALLATION DE TRAITEMENT DE DÉCHETS CONDUIT EN FRANCE AUJOURD'HUI. LA CONSTRUCTION DE LA NOUVELLE UNITÉ DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE A ÉTÉ AUTORISÉE FIN 2018. EN 2024, L'INSTALLATION EXISTANTE, MISE EN SERVICE EN 1969, SERA DÉFINITIVEMENT ARRÊTÉE PUIS DÉCONSTRUITE. LA NOUVELLE UNITÉ DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE FONCTIONNERA SEULE.

INTRODUCTION

Construit en 1969, puis modernisé en 1995 et 2005, le centre d'incinération à Ivry/Paris XIII constitue le plus grand incinérateur d'Europe (figure 2). Il réceptionne les ordures ménagères résiduelles de 14 communes du territoire du Syctom. La chaleur générée par la combustion des déchets permet de produire de la vapeur, pour alimenter les réseaux de chaleur de la CPCU, et de l'électricité, utilisée pour le fonctionnement du centre et dont le surplus est vendu à EDF.

Depuis fin 2018, la construction de la nouvelle unité de valorisation éner-

gétique du centre de valorisation des déchets ménagers à Ivry/Paris XIII est en cours. Elle remplacera l'usine existante en 2024, apportant un mieux-disant environnemental à tous les niveaux : odeurs maîtrisées, bruit atténué, rejets atmosphériques réduits, neutralisation renforcée des polluants, circulation diminuée...

La nouvelle unité traitera par incinération une quantité annuelle de 350 000 t d'ordures ménagères résiduelles, soit 50 % de moins que l'installation actuelle (figure 1).

Pendant les 6 années du chantier, l'usine actuelle continuera à fonctionner

1- Perspective UVE.

1- Perspective view of energy recovery unit.

afin de garantir la continuité du service public de traitement des déchets ménagers (figure 3).

D'une capacité annuelle de 350 000 t, la nouvelle unité de valorisation énergétique des déchets permettra la création d'une énergie de récupération à partir des déchets produits par 1,4 million d'habitants.

Après leur arrivée dans la fosse de stockage, les déchets sont introduits dans les deux fours à grilles.

Les fumées issues de la combustion circulent ensuite dans des chaudières et sont refroidies tandis qu'elles chauffent l'eau qui se transforme en vapeur. Puis, cette vapeur est envoyée dans une turbine associée à un alternateur pour produire l'électricité nécessaire au fonctionnement de l'installation et réinjecter l'excédent dans le réseau public de transport d'électricité. La vapeur en sortie de turbine est envoyée dans le réseau de chauffage urbain de la Ville de Paris.

- 2- Usine d'Incinération des Ordures Ménagères.
- 3- Calendrier simplifié du projet UVE.
- 4- Process de traitement UVE.

- 2- Household refuse incineration plant.
- 3- Simplified timeline of the energy recovery unit project.
- 4- Energy recovery unit treatment process.

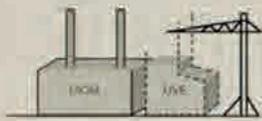


© SYCTOM 2

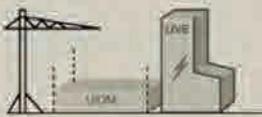
LES GRANDES ÉTAPES DU PROJET

- 2015** : signature du marché de conception, construction et exploitation.
- 2016** : arrêté préfectoral qualifiant le projet d'intérêt général (PIG).
- 2017** : instruction des demandes de permis de construire et d'autorisation d'exploiter de l'unité de valorisation énergétique par les services de l'État.
- 2018** :
 - Septembre : obtention du permis de construire la future UVE ;
 - Novembre : autorisation d'exploiter la future UVE ;
 - Démarrage des travaux de la nouvelle unité de valorisation énergétique, à côté de l'usine actuelle.
- 2024** : mise en service industrielle et exploitation de la nouvelle UVE.

CALENDRIER SIMPLIFIÉ DU PROJET UVE



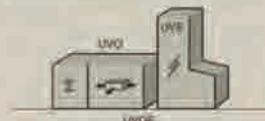
Fin 2018 > 2023
Construction de l'UVE avec maintien de l'UIOM en exploitation



> 2024
Déconstruction de l'UIOM et exploitation de l'UVE



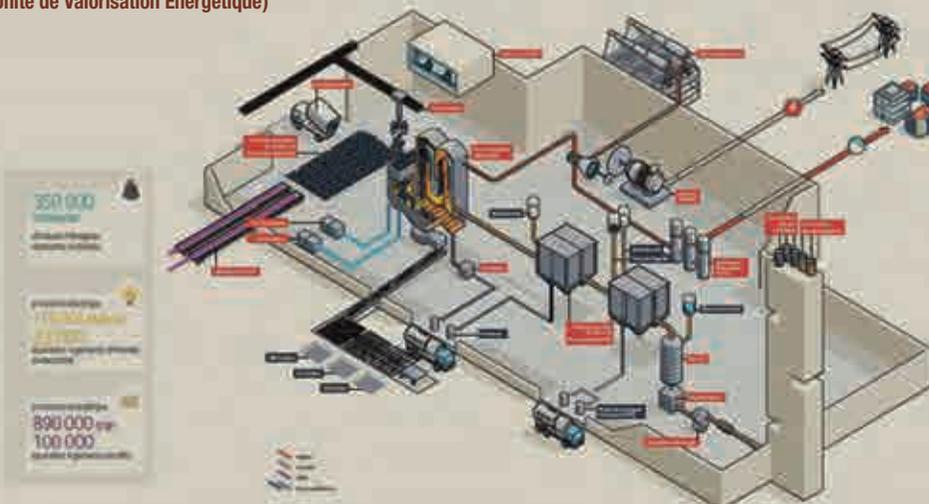
2024 > 2027
Construction de l'UVO et exploitation de l'UVE



2027
Exploitation de l'UVOE

© SYCTOM 3

PROCESS DE TRAITEMENT UVE (Unité de Valorisation Énergétique)



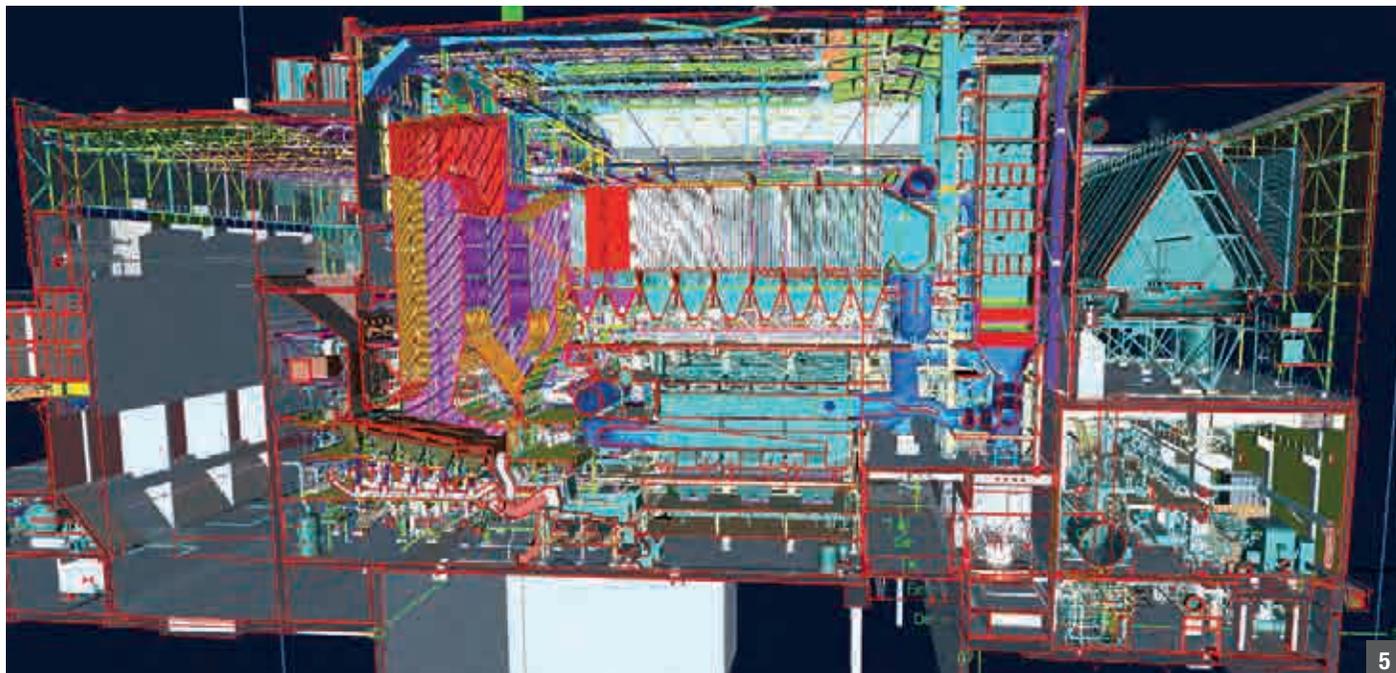
© IP13 4

FONCTIONNEMENT DE L'UVE

L'unité de valorisation énergétique d'Ivry assurera la combustion de 45 t de déchets ménagers résiduels par heure grâce à l'installation de technologies innovantes dans le secteur du traitement de déchets.

Cette unité sera ainsi dotée d'une fosse de réception des ordures ménagères de 20 000 m³, équipée de deux ponts roulants avec grappins, de deux groupes de fours-chaudières d'une capacité unitaire de 22,5 t/h, dans lesquels les déchets sont incinérés à une température 1 200 °C et d'un groupe turbo-alternateur à contre-pression qui permet de générer de l'électricité (figure 4). En effet, la chaleur générée par la combustion des déchets permet de produire de la vapeur pour alimenter les réseaux de chauffage urbain et de l'électricité utilisée pour le fonctionnement du centre et dont le surplus est vendu à EDF. Les différentes étapes de fonctionnement de l'UVE sont les suivantes :

- 1- Les camions-bennes collectent les ordures ménagères, entrent sur le site et sont pesés. Ils prennent ensuite la voie de desserte intérieure et la rampe d'accès pour arriver sur le quai de déchargement. Ils déversent alors les déchets dans la fosse.
- 2- Les techniciens manipulent le grappin pour brasser les déchets. Ils les transfèrent dans les deux fours-chaudières.
- 3- Les déchets sont brûlés sur les grilles mécaniques des fours. Un système de ventilation injecte de l'air pour permettre la combustion et ainsi maintenir la température au-dessus de 850 °C.



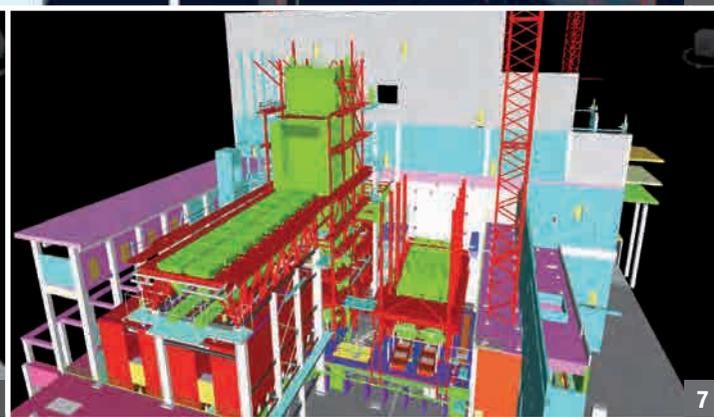
5

© VINCI ENVIRONNEMENT



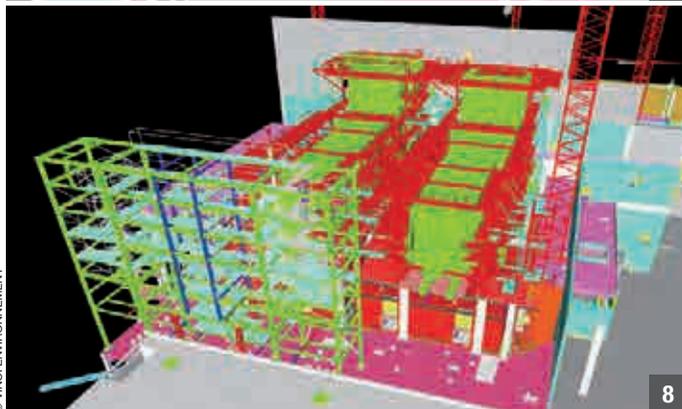
6

© VINCI ENVIRONNEMENT



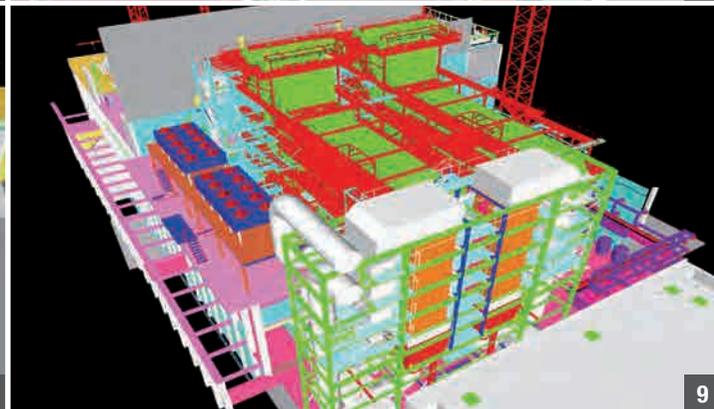
7

© VINCI ENVIRONNEMENT



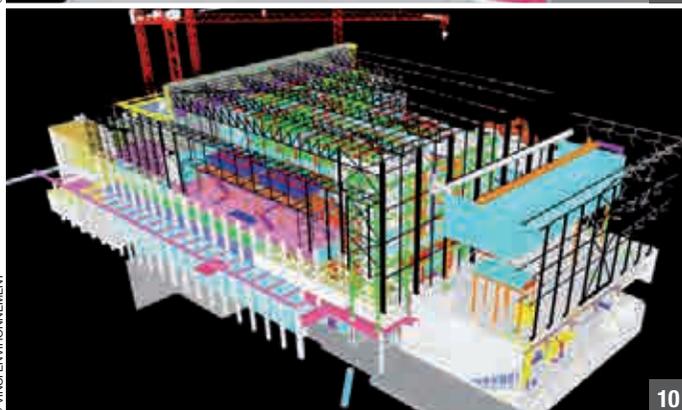
8

© VINCI ENVIRONNEMENT



9

© VINCI ENVIRONNEMENT



10

© VINCI ENVIRONNEMENT

4- Dans les chaudières, l'eau se transforme en vapeur qui est utilisée pour alimenter le réseau de chauffage urbain parisien afin de chauffer des immeubles ainsi que tous les hôpitaux publics parisiens. Elle produit également de l'électricité grâce à un groupe turbo-alternateur.

5- Les fumées issues de l'incinération des ordures ménagères sont épurées avant d'être rejetées dans l'atmosphère. Elles passent dans des

filtres qui captent les poussières et les polluants (double filtration à manches) puis dans un réacteur catalytique pour traiter les oxydes d'azote. Des analyseurs sont placés en cheminée et permettent une analyse en continu des fumées.

6- L'incinération produit également des mâchefers. Ces résidus solides sont stockés et évacués vers des centres de traitement. Ils seront traités puis réutilisés en sous-couche routière.

- 5- Extrait maquette 3D.
- 6- Début du montage du four ligne 1.
- 7- Montage des fours et chaudières ligne 1 et ligne 2.
- 8- Montage de la structure support des catalyseurs.
- 9- Fin des gros levages fours / chaudières / traitement des fumées.
- 10- Fin du montage de l'aérocondenseur.
- 11- Transport des caissons de filtres par péniche depuis Rouen jusqu'à Ivry-sur-Seine.
- 12- Avancement des travaux en février 2021.

- 5- Excerpt of 3D model.
- 6- Start of erection of the line-1 furnace.
- 7- Erection of furnaces and boilers of lines 1 and 2.
- 8- Erection of the catalytic converter support structure.
- 9- Completion of heavy lifting, furnaces/boilers / fume treatment system.
- 10- Completion of air-cooled condenser assembly.
- 11- Transporting filter caissons by barge from Rouen to Ivry-sur-Seine.
- 12- Work progress in February 2021.



© JULIEN BOUDET 11

FOCUS SUR LE PROCESS DE TRAITEMENT DOUBLE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

L'incinération des déchets produit des fumées à haute température, plus de 1 000 °C. La chaleur de ces fumées est récupérée grâce à deux chaudières qui permettent la production de vapeur à 60 bars et surchauffée à 420 °C.

TRAITEMENT SEC DES FUMÉES

Après leur passage dans les chaudières, la température des fumées est abaissée à environ 190 °C. Elles sont traitées avant d'être rejetées dans l'atmosphère.

Le Syctom a retenu un traitement des fumées par procédé sec, par opposition au traitement humide en place sur l'usine actuelle qui génère les panaches de vapeur d'eau. Le traitement sec ne consomme pas d'eau. Il est constitué de 2 filtres à manches

en série dans lesquels sont injectés du bicarbonate de sodium, du coke de lignite et du charbon actif bromé pour neutraliser et capter les principaux polluants et qui permettent ensuite de recueillir les résidus de filtration et les cendres. Les fumées transitent alors dans un réacteur catalytique où sont détruits les oxydes d'azote. Les fumées épurées sont enfin rejetées par la cheminée, sans panache visible.

SOUS-PRODUITS

La combustion des déchets ménagers génère plusieurs sous-produits. Les mâchefers, résidus inertes issus de l'incinération, sont débarrassés du métal qu'ils contiennent, stabilisés dans des installations spécialisées puis valorisés pour la construction routière. Les résidus de filtration et les cendres, issus du traitement des fumées, sont envoyés dans des installations de stockage adaptées.

GESTION DES ODEURS

Toutes les zones générant des odeurs (quai de déchargement et fosse de stockage des déchets notamment) sont fermées et maintenues en dépression : l'air vicié y est aspiré et injecté dans les fours. Les accès à ces zones sont fermés par des sas. Ces dispositions évitent la diffusion d'odeurs dans l'environnement extérieur de l'usine. Lors des phases d'arrêt technique des fours pour maintenance annuelle, l'aspiration de l'air dans les fours n'étant plus opérationnelle, des équipements spéciaux de désodorisation entrent en action, des ventilateurs aspirant les odeurs à traiter dans des capacités de 64 m³ de charbon actif, l'air traité étant en fine évacué en cheminée.

CHANTIER PROCESS

2021 fut une année charnière pour le chantier.

Les travaux de génie civil avancés en 2020 ont laissé place libre pour le montage des équipements constitutifs du procédé de traitement et de valorisation des déchets.

L'ensemble de ces équipements, plus communément appelé "process", est composé des principaux éléments suivants : fours, chaudières, filtres à manches, réacteurs catalytiques, groupe turbo-alternateur ou encore l'aérocondenseur.

L'environnement immédiat du site de la construction est extrêmement contraint : UIOM existante, garage automobile, immeubles de bureaux, voies SNCF, routes, etc.

Par ailleurs, le site n'offre pas de place suffisante pour le stockage et le pré-montage des équipements.

Pour s'adapter à cet état de fait, de nombreuses solutions ont été mises en œuvre s'articulant notamment autour :

- D'une préparation de chantier coordonnée : anticipation des méthodes, préparation et phasage du chantier ;
- D'un suivi logistique maîtrisé : pré-fabrication en atelier, utilisation d'une base arrière stockage / pré-montage et gestion des livraisons à flux tendu ;
- De l'utilisation de grues de forte capacité.

PRÉPARATION DE CHANTIER

La préparation de chantier est une phase déterminante du projet de construction. Elle implique l'ensemble des acteurs du chantier et prend en compte les aspects réglementaires, contractuels, pratiques et sécuritaires.



© FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE 12

En effet, la mise à poste et le montage des équipements se fait à partir de la mise à disposition des ouvrages par le cotraitant en charge du génie civil, jusqu'à la fin des gros levages. Il est donc important d'y attacher un soin spécifique, car une bonne préparation de chantier est le meilleur garant du respect des délais.

Les grandes phases de la construction du procédé de l'UVE sont les suivantes.

Opérations anticipées /

Mises à poste :

Certains équipements particulièrement volumineux doivent être livrés et mis à poste avant que leur environnement en béton soit terminé. Ils ont été manutentionnés par les grues process ou génie civil.

Par exemple :

- Au niveau -1.00 : diverses cuves et réservoirs du traitement de l'eau.
- Au niveau +6.50 : 6 silos cendres, réactifs et REFIOM :
 - Dimensions : 3,8 m (D)x13 m (h).
 - Poids à vide unitaire : 8 t.
- Au niveau +12.00 : 2 ponts mâche-fers et une trémie de rechargement :
 - Dimensions : 10,3 m (L)x3 m (l).
 - Poids : 9 t.

Période des gros levages :

On parle ici des levages effectués pour le montage des éléments de fours, de chaudières et du traitement des fumées qui sont effectués principalement avec les grues G7 et G8. D'autres grues mobiles ont également été utilisées (grues de pied ou de déchargement). Cette période couvre 12 mois complets commençant à la date de mise à disposition totale des zones par le génie civil. La période se termine à la date de mise à disposition de la zone par le process pour le début de la phase de construction de la toiture du hall par le génie civil.

Par exemple :

- Montage des ponts-roulants OM : mise à poste des deux ponts sur leurs rails à +32 m :
 - Dimensions d'un quadrilatère (poutres + sommier) : longueur 25 m, largeur 6 m ;
 - Poids des quadrilatères : 1 quadrilatère de 32 t par pont ;
 - Poids des chariots : 1 chariot de 12 t par pont.
- Montage des filtres à manches :
 - Dimensions : longueur 16 m, largeur 9 m et hauteur 12 m ;
 - Poids : 120 t chacun.
- Montage des équipements de la valorisation : groupe turbo-alternateur :



13 © FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE

13- Avancement des travaux en juin 2021.

14- Avancement des travaux en août 2021.

13- Work progress in June 2021.

14- Work progress in August 2021.

- Dimensions : turbine 4,5 m (L) x 3 m (l) x 3 (h) / accouplement 1,7 m (L) x 0,8 m (l) x 1,2 (h) / alternateur 3,5 m (L) x 2 m (l) x 3,9 (h) ;
 - Poids : turbine (40 t) / accouplement (13 t) / alternateur (57 t).
- Les phases importantes du montage du procédé UVE ont été étudiées par un phasage 3D (figures 5 à 10).

SUIVI LOGISTIQUE

Dans cet environnement extrêmement contraint (milieu urbain très dense, espaces de stockage et de pré-assemblage sur site réduits à leur minimum, présence de l'usine actuelle en fonctionnement avec ses circulations de véhicules, etc.), des solutions ont été trouvées permettant la continuité des opérations de montage.

Ainsi, une plateforme portuaire de 3 000 m² a été louée en bord de Seine, très proche du chantier, sur la commune d'Ivry-sur-Seine. Cette plateforme a permis notamment de faire livrer les équipements les plus volumineux par voie fluviale, évitant ainsi les difficultés de convois routiers de ce volume en région parisienne et améliorant par la même occasion le bilan carbone de ces acheminements (figure 11).

L'acheminement sur le site depuis le quai de Seine a été réalisé ensuite de nuit par des convois routiers spéciaux sur les 500 m de trajet restants. Plusieurs autres plateformes de stockage temporaires ont été louées en Île-de-France pour permettre des livraisons en flux tendu.

À noter qu'une partie du manque de place sur le site a été compensée par la construction d'une estacade provisoire de 800 m² en acier, juchée à 8 m de hauteur et permettant, dessus, de faire du pré-assemblage d'éléments process, tout en permettant, dessous, de faire circuler les véhicules du chantier et les véhicules d'exploitation de l'usine existante (figures 12 à 14).

PILOTAGE DES GRUES : FOCUS SUR LA GRUE G8

La grue G8 est une grue de forte capacité, à flèche relevable (mât 65,1 m et flèche 66 m), dont la position a été déterminée pour empêcher le survol en girouette des voies SNCF et réduire les lentilles de coactivité avec les autres grues du projet, tout en atteignant le



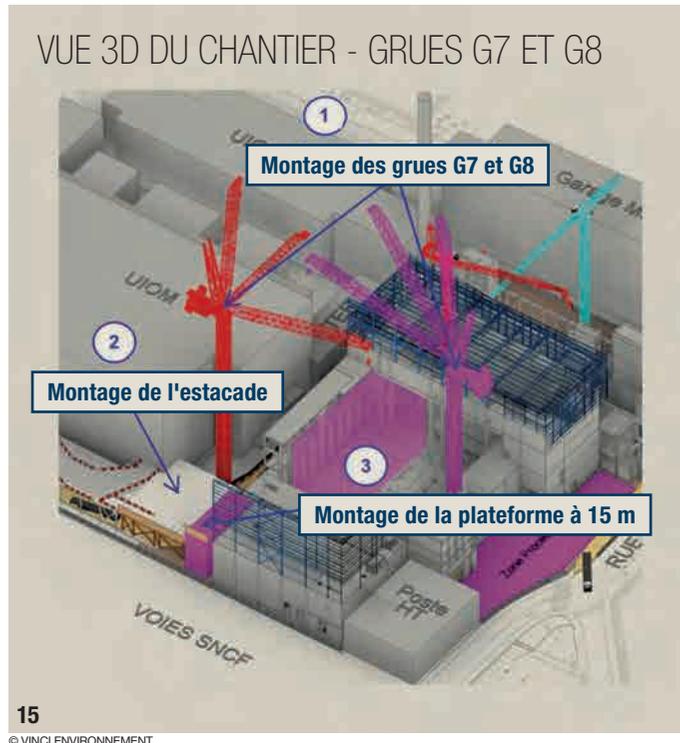
14 © FRANCK BADAIRE PHOTOGRAPHE

15- Vue 3D du chantier - Grues G7 et G8.

15- 3D view of the site - Cranes G7 and G8.

colis le plus éloigné (cellule aérocondenseur).

Le type de la grue et l'implantation de celle-ci ont été retenus afin de couvrir les zones de travaux du chantier de l'UVE nécessitant la mise en place de colis de poids important (process). La G8 a une capacité de levage de 65 t à 30 m et 28 t à 66 m. Elle est nécessaire pour porter des éléments préfabriqués conséquents sur toute son emprise. Elle soulève les éléments de charpente métallique, de chaudronnerie, d'équipements plus ou moins volumineux, notamment filtres à manches, blocs d'économiseur des



15

© VINCI ENVIRONNEMENT

chaudières, cellules d'aérocondenseur ou éléments de cheminées. Cette grue minimise l'utilisation des grues mobiles dans cette zone (figure 15).

Du fait de l'exiguïté du site, la grue G8 a été montée par une grue mobile en partie basse (mât de 20 m et tête de grue et flèche), puis elle s'est "auto-élevée" par un système de vérinage portant son mât de 20 m à 65 m.

CALENDRIER 2022/2023

Une fois ces éléments assemblés et connectés entre eux (chaudronnerie, tuyauteries, câblages), les premiers essais à froid pourront débuter à l'automne 2022 et les essais à chaud mi-2023.

La mise en service industrielle interviendra au printemps de l'année 2024. C'est à cette échéance que l'usine actuelle sera mise définitivement à l'arrêt pour être ensuite définitivement déconstruite. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- COÛT TOTAL DE L'OPÉRATION : 483 millions d'euros (dont 194 millions d'euros pour la partie Process)**
- DURÉE TOTALE DU CHANTIER : 65 mois**
- DURÉE DU CHANTIER PROCESS : 32 mois**
- DURÉE DE LA MISE EN SERVICE : 10 mois**
- TONNAGE DE CHARPENTE PROCESS : 4 000 t**
- QUANTITÉ D'OMR TRAITÉES : 45 t/heure (350 000 t/an)**
- PUISSANCE ÉLECTRIQUE PRODUITE : 7 MWe**
- QUANTITÉ DE CHALEUR EXPORTÉE : 130 t de vapeur / heure**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :**
Syctom
- ENTREPRISE MANDATAIRE :**
Société Ivry Paris XIII (groupe Suez)
- MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE / ARCHITECTURALE :**
Bg Ingénieurs Conseils / Aia Life Designers
- ENTREPRISES PROCESS :**
Vinci Environnement (mandataire) / Hitachi Zosen Inova
- ENTREPRISES GÉNIE CIVIL ET ÉLECTRICITÉ :**
Eiffage Génie Civil / Chantiers Modernes Construction / Gtie Infi / Fayat Energie Services

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE ENERGY RECOVERY CENTRE IN IVRY-PARIS XIII

JULIEN BOUDET, VINCI ENVIRONNEMENT - RÉMI GODEFROY, VINCI ENVIRONNEMENT
PHILIPPE LAURENT, VINCI ENVIRONNEMENT

The old plant, put into operation in 1969, is even now one of the largest incineration centres in Europe. The future energy recovery unit will still perform waste recovery in the form of electricity and heat production for the Paris heating network. Construction work started at the end of 2018, and the unit will replace the existing plant in 2024. Throughout the works, the present plant continues to operate. The works focused first on the relocation of certain functions of the current plant in order to clear the land required for the new plant. 2020 was devoted mainly to civil engineering work. At the start of 2021, two luffing-jib tower cranes of high lifting capacity were moved into position simultaneously. Work on the process and equipment then got under way with assembly of the steel structures and installation of the main fume treatment and purification equipment. □

DISEÑO / CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE IVRY-PARIS XIII

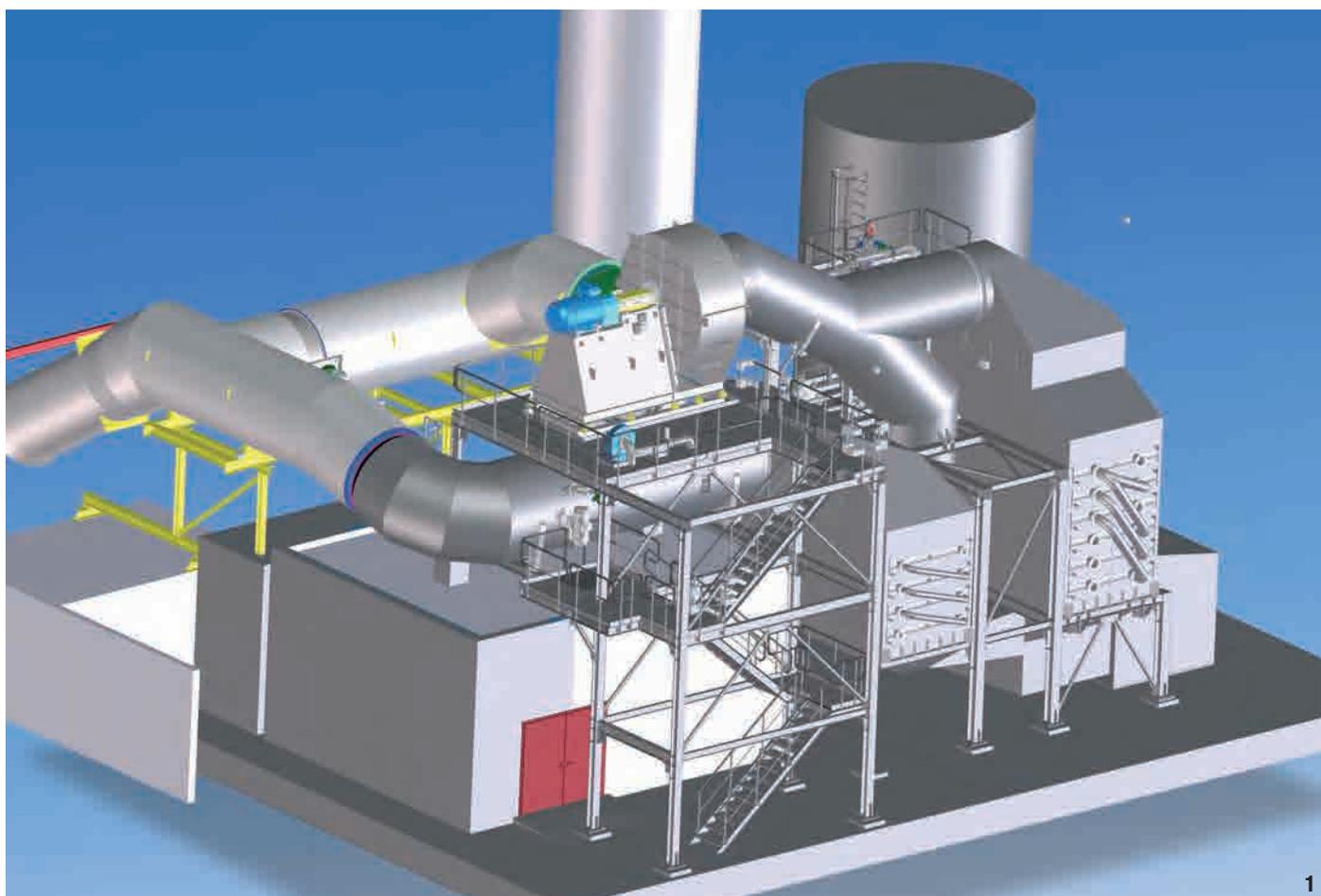
JULIEN BOUDET, VINCI ENVIRONNEMENT - RÉMI GODEFROY, VINCI ENVIRONNEMENT
PHILIPPE LAURENT, VINCI ENVIRONNEMENT

La antigua planta, inaugurada en 1969, es hoy todavía uno de los centros de incineración más importantes de Europa. La futura Unidad de Valorización Energética (UVE) seguirá permitiendo aprovechar los residuos, produciendo a partir de ellos electricidad y calor para la red de calefacción de París. Su construcción empezó a finales de 2018, y en 2024 sustituirá a la planta existente, que se mantendrá en funcionamiento a lo largo de todo el período de obras. Éstas se centraron inicialmente en la relocalización de algunas funciones de la planta actual para liberar la superficie necesaria para la nueva planta. 2020 se dedicó principalmente a las obras de ingeniería civil. A comienzos de 2021, se instalaron simultáneamente dos grúas torre de brazo móvil y fuerte capacidad de elevación. A continuación, se iniciaron las obras dedicadas al proceso y los equipamientos, con el montaje de las estructuras metálicas y la instalación de los principales equipos de tratamiento y depuración de humos. □

RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE - BLUE PAPER À STRASBOURG

AUTEURS : FRÉDÉRIC BAZIN, DIRECTEUR DÉPARTEMENT BÂTIMENT GRAND EST, INGÉROP CONSEIL & INGÉNIERIE - JOËL ISSENBECK, INGÉNIEUR ET DIRECTEUR DU PROJET, INGÉROP CONSEIL & INGÉNIERIE

SUR LE TERRITOIRE DU PORT AUTONOME DE STRASBOURG, UN NOUVEL ÉQUIPEMENT DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE A ÉTÉ CONÇU POUR ALIMENTER LES RÉSEAUX DE CHAUFFAGE URBAIN DE L'OPÉRATEUR R-CUA (RÉSEAUX DE CHALEUR URBAINS D'ALSACE) SUR L'EUROMÉTROPOLE DE STRASBOURG. DE LA PHASE DE CONCEPTION JUSQU'À LA RÉALISATION, LES ÉQUIPES DE MOA ET DE MOE ONT TRAVAILLÉ DE CONCERT AFIN DE DÉVELOPPER UNE TECHNOLOGIE INNOVANTE QUI UTILISE UNE TECHNIQUE ENCORE EN DÉVELOPPEMENT : LES POMPES À CHALEUR HAUTE TEMPÉRATURE.



1

© SCHEUCH

OPPORTUNITÉ DU PROJET : UN SITE COMPLEXE AU CŒUR D'UN QUARTIER EN PLEINE MUTATION

La papeterie Blue Paper SAS implantée dans le quartier du Port du Rhin à Strasbourg dispose d'une chaufferie "biomasse" de 45 MW fonctionnant

en continu (toute l'année) et à pleine puissance afin de délivrer de la vapeur au process de la machine à papier. En sortie de ce process biomasse, la chaleur résiduelle contenue dans les fumées, dite "fatale", n'était pas valorisée et était somme toute perdue car non valorisable sur site.

1- Maquette numérique de l'économiseur et du condenseur.

1- Digital model of the economiser and the condenser.

L'idée du projet consistait à récupérer cette chaleur fatale pour alimenter un premier réseau de chauffage urbain à proximité du site, conçu, financé et exploité par Réseaux de Chaleur Urbains d'Alsace. Cette installation doit permettre, à terme, de fournir une puissance nomi-



© INGEROP



© INGEROP

nale de 15,6 MW à R-CUA, ce qui correspond au besoin en chauffage de plusieurs milliers de logements et à une économie potentielle de CO₂ estimée à 30 000 t par an.

Pour ce faire, devait être réalisé d'abord un dévoiement de la chaleur au droit de la cheminée existante. Puis, la chaleur ainsi détournée devait permettre d'alimenter un circuit hydraulique qui se raccordera sur une installation de valorisation et distribution R-PAS intégré sur le site Blue Paper avant d'être distribuée par le réseau de chauffage urbain.

Ce transfert de chaleur implique la mise en œuvre en premier lieu d'une

2- Face de l'économiseur et du condenseur lors de leur mise en œuvre.

3- Économiseur et condenseur lors de leur mise en œuvre.

4- Maquette numérique des locaux.

2- Front view of the economiser and the condenser at installation.

3- Economiser and condenser during installation.

4- Digital model of the premises.

installation spécifique possédant un économiseur et un condenseur sur une structure métallique adéquate (figures 1, 2 et 3).

Puis, il a été décidé l'utilisation de pompes à chaleur reliées sur cette source afin d'obtenir en sortie de bâtiment un unique circuit hydraulique (aller/retour) d'eau chaude supérieure à 85°C.

Ce projet a mobilisé les compétences d'Ingerop dans tous les corps de métier de son département Bâtiment et Industrie, à savoir, en structure, électricité, CVC, tuyauterie industrielle, sécurité incendie, clos et couvert et corps d'états secondaires.

UN PROJET COMPLEXE : LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

Les solutions classiques de production d'eau chaude supérieure à 85°C sont constituées de chaudières (généralement gaz ou biomasse) qui fonctionnent à ces températures de manière courante, mais pas par des pompes à chaleur.

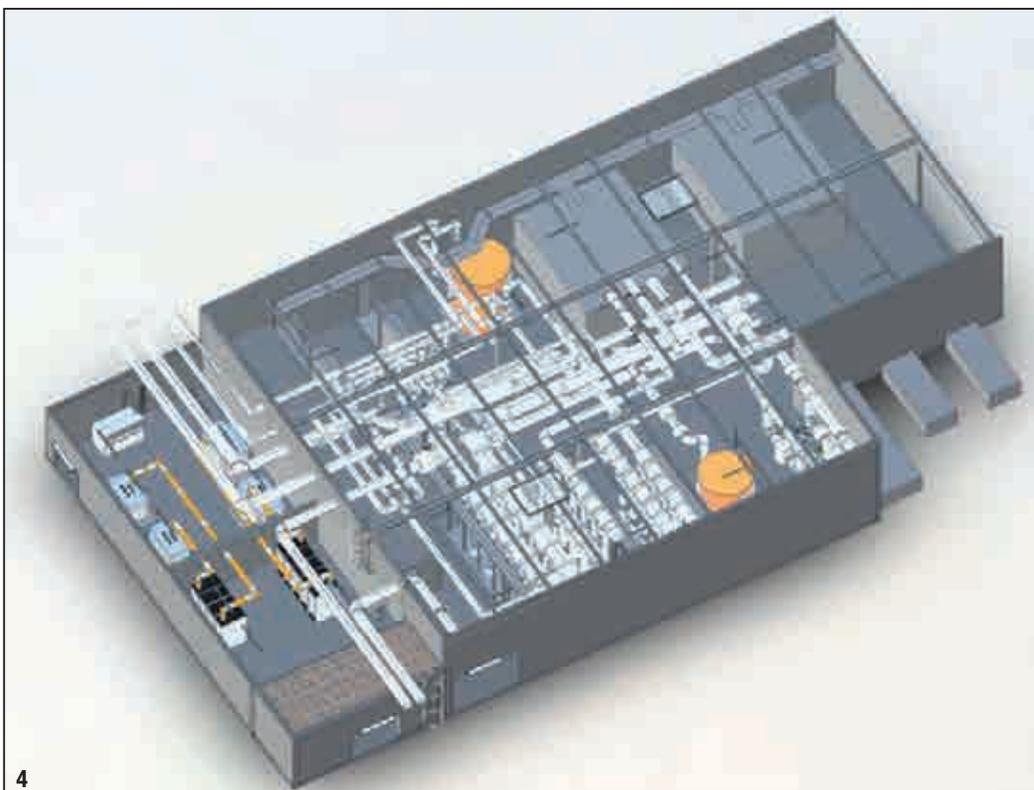
En effet, l'essentiel du marché des pompes à chaleur est porté vers les températures basses ou moyennes, donc inférieures à 55°C. Ce projet constituait par conséquent un vrai défi pour les équipes de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre, qu'il a été décidé de relever.

En effet, l'utilisation de pompes à chaleur ayant comme source un condenseur de fumées et comme utilisateur un réseau de chaleur permet un double gain écologique et économique. Les recherches effectuées s'inscrivent dans une démarche environnementale et répondent à des objectifs locaux et nationaux :

- Diminuer la température des fumées rejetées par la chaudière biomasse de 45 MW ;
- Densifier et étendre les réseaux de chaleur existants tout en maintenant un fort taux EnR en permettant aux usagers de décarboner leurs usages.

L'étude a ainsi permis de démontrer la possibilité technique d'alimenter un réseau de chaleur urbain à partir d'une solution de récupération d'énergie fatale, en utilisant une technologie encore en développement : les pompes à chaleur haute température (>85°C).

Et ceci dans une gamme de puissance de 7 MW thermiques, soit la capacité de fournir l'équivalent de plus de 1 000 foyers en chaleur.



© INGEROP



5 © INGEROP

UN PROJET COMPLEXE : LES TECHNOLOGIES

Nous avons identifié plusieurs technologies sur le marché, chacune ayant ses caractéristiques et son intérêt :

- Fluide HFC : très haute température (>100°C) ;
 - Fluide ammoniac : meilleur performances (COP) du marché ;
 - Fluide HFO : GWP du gaz proche de 0 ;
 - Compresseurs à vis adaptés à moyenne puissance (<1 MW) ;
 - Compresseurs centrifuges adaptés aux grandes puissances (>1 MW).
- La puissance thermique du projet a été un point crucial, limitant le choix des technologies et des constructeurs aptes à fournir un tel équipement. Par conséquent, afin de répondre aux besoins du projet, deux propositions ont été élaborées :

- Compresseurs à vis : il est nécessaire de mettre en place plusieurs (au moins 3) Pompes à Chaleur, et certaines en série afin d'atteindre les températures demandées ;
- Compresseurs centrifuges : 1 ou 2 Pompes à Chaleur suffisent à répondre aux besoins, tout en fonctionnant de manière indépendante.

Afin de limiter le nombre de machines et de simplifier les raccordements hydrauliques et la régulation de l'ensemble, a finalement été retenue la technologie de compresseurs centrifuges, sur la base d'une analyse multicritères :

- Coût global ;
- Rendement et performances : COefficient de Performance (COP) et évolution du COP en fonction de différents paramètres (températures, pourcentages de charge) ;
- Impact environnemental (fluides frigorigènes, consommations), évaluation de l'équivalent en tonnes de CO₂ émis ;
- Contraintes réglementaires (ICPE) et dispositifs de sécurité (détection et alarme) ;
- Raccordements hydrauliques et électriques, régulation ;
- Sécurisation du process (figure 4).

UN PROJET COMPLEXE : LA MISE EN ŒUVRE

Une fois les études menées à leur terme et les marchés passés aux entreprises, les travaux ont pu débuter avec, dans la ligne de mire, la mise en service de l'installation. En effet, des incertitudes subsistaient, notamment sur le fait que

5- Intérieur des locaux pendant la réalisation.

5- Interior of the premises during work execution.

la pompe à chaleur allait parfaitement répondre aux besoins, en termes de rendement et de performances et que cela correspondrait aux caractéristiques théoriques définies lors des études (la machine ayant néanmoins déjà été testée sur banc d'essais en usine). Ces travaux ont nécessité de prendre en compte des particularités relatives aux pompes à chaleur haute température et au niveau de puissance de cette installation :

- Délais d'études et de fabrication très importants : commande de la Pompe à Chaleur en août 2020 pour une livraison début mai 2021, incluant des essais sur plateforme en présence du maître d'ouvrage ;
- Machine très imposante (environ 6,3x5,5 m sur une hauteur de 4,3 m) et très lourde (38 t à vide et 45 t en fonctionnement) (figure 5) ;

- Sécurité autour des 3000 kg de fluide frigorigène (R1234ze, non toxique et faiblement inflammable), avec notamment des soupapes de sécurité à canaliser vers la toiture en tube de Ø 125 mm ;
- Deux étages de compression, avec un total de 1900 kW de moteurs électriques ;
- Création d'un local spécifique aux variateurs de fréquence (température maximale de 40°C au lieu de 50°C pour la Pompe à Chaleur), avec 160 kW à évacuer. Ce refroidissement est optimisé par l'utilisation d'un *rooftop* fonctionnant en *free-cooling* la plus grande partie de l'année ;
- Création d'un réseau hydraulique avec *dry-cooler* extérieur pour le refroidissement de l'huile des compresseurs (celle-ci ne pouvant pas être refroidie par le fluide comme dans les machines à plus basse température) (figure 6) ;
- Alimentation en air comprimé de bonne qualité, la bonne régulation de la machine nécessitant d'utiliser des servomoteurs pneumatiques, bien plus réactifs que les électriques.



© INGÉROP

6

Le circuit économiseur a été mis en service en février 2021, avec un échangeur de chaleur provisoire installé dans un conteneur, le bâtiment de la centrale d'énergie étant encore en construction. Au mois de juillet 2021, cette production a été basculée sur l'installation définitive réalisée entre temps dans la centrale.

À cette date, l'ensemble de l'installation était prêt pour la mise en service, mais la demande du réseau de chaleur n'est pas suffisante en été (environ 400 kW, alors que la puissance minimale de la Pompe à Chaleur est de 1,6 MW, sans compter que l'économiseur doit être à 100% dans le même temps). La puissance minimale de 5 MW est atteinte en saison de chauffe, soit à partir d'octobre.

6- Extérieur des locaux.

6- Exterior of the premises.

La Pompe à Chaleur a ainsi été mise en service en novembre 2021, après une phase d'arrêt technique de la chaudière biomasse.

On n'a pas réalisé de prototype, mais la Pompe à Chaleur a été testée sur banc d'essais en sortie d'usine, en présence du maître d'ouvrage, selon 4 points de fonctionnement différents, pour valider les performances attendues. Et en effet, après mise en service, les performances attendues pour cette centrale d'énergie sont atteintes

après quelques semaines d'exploitation. Les performances sur la durée sont en cours d'analyse actuellement, sur une exploitation plus longue (de l'ordre d'une à deux années de fonctionnement).

SYNTHÈSE DU PROCESS

- Un premier étage de récupération sur les fumées par un économiseur d'une puissance nominale de 3,4 MW, qui permet d'injecter directement la chaleur récupérée dans le réseau de chaleur à une température de 105°C, grâce à un échangeur de chaleur à plaques.
- Le second étage qui prend la forme d'un condenseur sur les fumées, qui alimente un circuit à la température de 35/45°C, d'une puissance de 5,2 MW dans un premier temps. Celui-ci recevra une extension dans deux ans pour porter la puissance à 9,1 MW.
- Le circuit à 35/45°C sert de source à une PAC haute température de 6,8 MW au régime de 67/90°C. Il est prévu une seconde PAC, de 5,1 MW environ (sous réserve d'évolutions technologiques) lors de l'extension du condenseur.
- La gestion de la production en prenant en compte les besoins du réseau de chaleur est assurée grâce à des automatismes programmés par les équipes spécialisées du maître d'ouvrage, à l'aide de deux capacités tampons de 20 m³ chacune (une sur l'économiseur et une sur le condenseur). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : R-PAS (R-CUA : 82 %, PAS – Port Autonome de Strasbourg : 10 %, Banque des territoires : 8 %)

MAÎTRE D'ŒUVRE TOUS CORPS D'ÉTAT : Ingérop Conseil & ingénierie

ÉCONOMISEUR ET CONDENSEUR : Scheuch

PAC HAUTE TEMPÉRATURE : Johnson Controls Industries

TUYAUTERIES EXTÉRIEURES SUR RACK : Gnt Industrie Maintenance

HYDRAULIQUE INTÉRIEURE : Stic – groupe Mels

ÉLECTRICITÉ : Actemium

VRD + GROS ŒUVRE : Dicker

ABSTRACT

WASTE HEAT RECOVERY - BLUE PAPER IN STRASBOURG

FRÉDÉRIC BAZIN, INGÉROP CONSEIL & INGÉNIERIE -
JOËL ISSENBECK, INGÉROP CONSEIL & INGÉNIERIE

Waste heat is the thermal energy given off by all the furnaces, boilers, reactors and machines used by industrial firms to produce goods and materials. The development of the project for recovery of waste heat from fumes, combined with a high-temperature heat pump, at the Blue Paper paper mill in Strasbourg, was an opportunity to exploit this energy by supplying the district heating networks of the operator R-CUA (Réseaux de Chaleur Urbains d'Alsace) in the Strasbourg Eurometropolis. The project began in 2019 with a feasibility study and was put into operation in 2021. Performance assessments are underway. □

RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL - BLUE PAPER EN ESTRASBURGO

FRÉDÉRIC BAZIN, INGÉROP CONSEIL & INGÉNIERIE -
JOËL ISSENBECK, INGÉROP CONSEIL & INGÉNIERIE

El calor residual es la energía térmica disipada por el conjunto de los hornos, calderas, reactores y máquinas que utilizan las empresas industriales para producir bienes y materiales. El desarrollo del proyecto de recuperación de calor residual del humo, combinado con una bomba de calor a alta temperatura, de la fábrica de papel Blue Paper de Estrasburgo (67), ha brindado la oportunidad de aprovechar esa energía alimentando las redes de calefacción urbana del operador R-CUA (Réseaux de Chaleur Urbains d'Alsace) en la Eurometrópolis de Estrasburgo. El proyecto, iniciado en 2019 con el estudio de viabilidad, entró en servicio en 2021. Los análisis de rendimiento están en fase de elaboración. □



1
© RTE

LES TRAVAUX À L'ATERRAGE DU RACCORDEMENT ÉLECTRIQUE DU PARC ÉOLIEN EN MER DE FÉCAMP

AUTEURS : YANN RENOUL, CHEF DE PROJET, ARTELIA - VALENTIN MIGEON, PILOTE INGÉNIEUR DE PROJET LIAISONS SOUS-MARINES, RTE

ISSU DU 1^{er} APPEL D'OFFRE GOUVERNEMENTAL POUR L'ÉOLIEN EN MER, LE PROJET DE PARC EST PORTÉ PAR LA SOCIÉTÉ EOLIENNES OFFSHORE DES HAUTES-FALAISES (EOHF). IL COMPORTE 71 ÉOLIENNES DE 7 MW POUR UNE PUISSANCE TOTALE DE 497 MW. SON RACCORDEMENT AU RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ EST, COMME POUR TOUS LES PROJETS ÉOLIENS EN MER ISSUS D'UN APPEL D'OFFRE DE L'ÉTAT, SOUS LA MAÎTRISE D'OUVRAGE DE RTE. D'UNE LONGUEUR DE 50 km, LE RACCORDEMENT AU RÉSEAU PERMETTRA D'ÉVACUER, VIA DEUX LIAISONS 225 kV, TOUTE LA PUISSANCE DU PARC SUR LE RÉSEAU 225 kV EXISTANT AU NORD DU HAVRE. DANS SA PARTIE MARINE, LE RACCORDEMENT EST CONSTITUÉ DE DEUX LIAISONS 225 kV HVAC, CÂBLES XLPE, EMBARQUANT CHACUNE 2 CÂBLES OPTIQUES 48 BRINS. CES DEUX CÂBLES ARRIVENT À TERRE DANS LE PORT DE FÉCAMP.

LES SPÉCIFICITÉS DE L'ATERRAGE

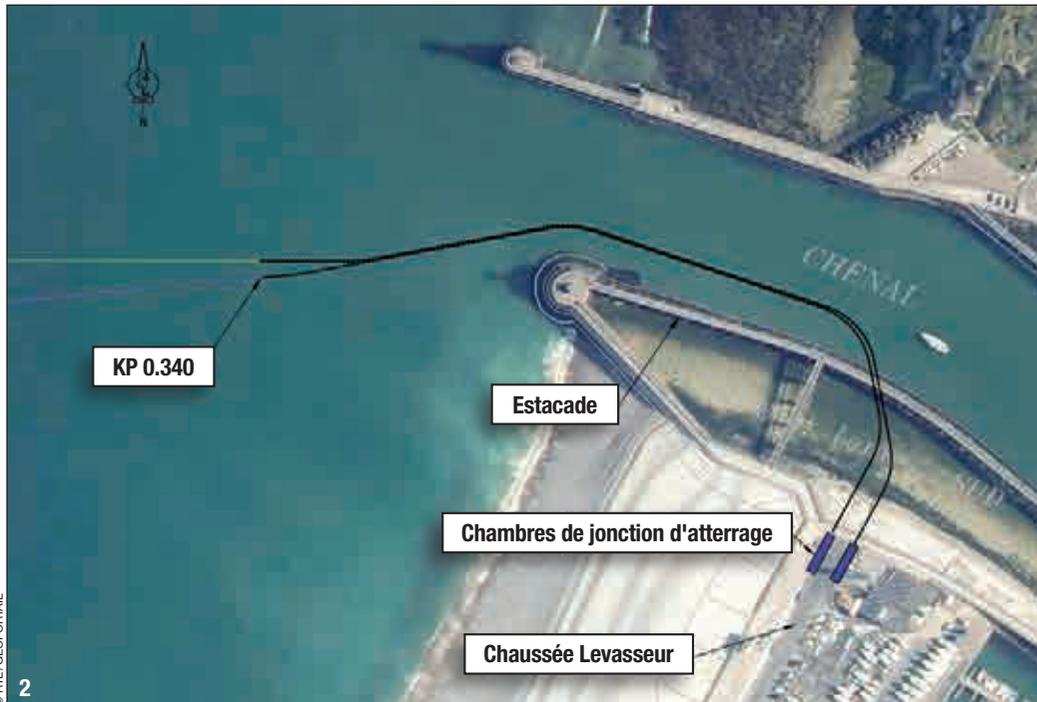
L'atterrage est la zone située entre les chambres de jonction d'atterrage, ouvrages de génie-civil permettant la jonction à terre entre les câbles sous-marins et souterrains, et la zone en mer à partir de laquelle les câ-

bles sont posés par le navire câblé. Pour choisir l'emplacement de cette zone très particulière, combinant à la fois de fortes contraintes techniques, environnementales et d'acceptabilité, les études préliminaires menées par RTE en 2013-2014 ont orienté le projet vers un atterrage hors zone de

1- Remorquage du tronçon principal des fourreaux dans le port de Fécamp.

1- Towing the main section of the ducts in Fécamp Port.

falaises à Fécamp. La plage, du fait de la couverture de galets (pénalisante vis-à-vis du dimensionnement thermique des câbles) et des rideaux de palplanches soutenant la promenade du front de mer a dû être écartée. RTE a donc choisi un atterrage dans le chenal d'entrée du port de Fécamp.



© RTE/GEOPORTAL
2

Les fourreaux sont installés en tranchée dans le chenal de navigation, puis à travers le brise-lames sud. Ce brise-lames est constitué d'un perré d'amortissement de la houle supportant une estacade à claire voie en structure bois et d'un mur chasse-mer en maçonnerie, pour aboutir sur la voirie où sont implantées les chambres de jonction d'atterrage.

L'ensemble des ouvrages se trouve sur le domaine du port de Fécamp, propriété du Département de Seine-Maritime.

Ainsi, le site retenu comporte de forts défis techniques :

2- Vue en plan des ouvrages de génie civil à l'atterrage.
3- Élévation longitudinale de la passerelle transversale du brise-lames Sud.

2- Plan view of the civil works structures at the landing.

3- Longitudinal elevation view of the transverse walkway on the southern breakwater.

→ Contraintes liées à la conception et à la réalisation des travaux de génie-civil, sur des ouvrages portuaires anciens ;

→ Alors que la grande majorité des opérations de tirage à l'atterrage se font en ligne droite, l'atterrage du projet de Fécamp est très particulier car il présente 2 points d'inflexion, qui augmentent sensiblement les efforts de frottement lors du tirage du câble (figure 2) ;

→ Enfin les travaux maritimes dans le chenal et sur le bas du perré sont complexes et nécessitent une forte technicité ainsi qu'une météorologie favorable.

LE BRISE-LAMES

Les brise-lames sont des plans inclinés avec un seuil au niveau des basses mers, implantés le long du chenal à l'intérieur du port, à l'arrière des jetées. Ils ont pour rôle de dissiper une partie de l'énergie de la houle pénétrant dans le port. Cette configuration est apparue vers le milieu du 18^e siècle. Aujourd'hui, on la retrouve dans les ports de Saint-Valéry-en-Caux et du Tréport. Les estacades qui bordent le chenal étaient utilisés par les lamaniers pour le halage des voiliers.

À Fécamp, les ouvrages situés sur la rive sud du chenal furent construits en plusieurs phases à partir des années 1770, des parties d'ouvrages étant fréquemment détruites par les tempêtes. Leur configuration actuelle date des années 1880.

Le brise-lames Sud est un perré en pierres maçonnées d'une longueur totale d'environ 250 m, présentant une pente moyenne de 12% (figure 3).

Le perré a été construit directement sur les terrains en place, constitués de galets, graviers et alluvions reposant sur un substratum crayeux.

Dans sa partie centrale, le brise-lames s'appuie sur un seuil bordant le chenal, constitué de 18 caissons en béton de 3,0 m x 3,0 m de section et de longueur variable (figure 4), formant un seuil à la cote de +2,00 m CM environ (cotes marines, c'est-à-dire à environ 2,00 m au-dessus du niveau des plus basses eaux), alors que le chenal est dragué à -1,50 m CM. Les fondations, qui datent de 1883-84 ont été construites à l'intérieur de caissons métalliques à air comprimé (figure 5). ▷



© ARCHIVES DU PORT DE FECAMP
3

LES SPÉCIFICITÉS ET CONTRAINTES LIÉES AU FRANCHISSEMENT DES OUVRAGES EXISTANTS

Le tracé en plan et le profil en long ont été influencés par différents paramètres :

→ Les études de dimensionnement électrique et thermique réalisées par RTE ont démontré la nécessité d'un entr'axe de 10 m entre les 2 câbles à terre et dans la zone de marnage. Ceci implique la réalisation de 2 tranchées distinctes sur la partie supérieure du brise-lames, alors que, dans le chenal, les fourreaux sont installés dans la même tranchée ;

→ Le tracé a été optimisé dans la partie basse du perré afin de limiter les opérations de démolition à un seul caisson, qui sera entièrement démantelé et reconstruit durant les travaux ;

→ À l'interface entre le brise-lames et le chenal, le fond de la tranchée se trouve à environ 2,50 m sous le niveau de fondation du caisson, conduisant à une hauteur de soutènement de près de plus de 6 m dans la partie basse du perré après excavation de la tranchée (figure 6) ;

Pour les besoins des travaux :

→ Les tranchées sont réalisées à l'intérieur de blindages en palplanches qui, en fonction des tronçons, sont auto-stables, butonnées, ou ancrées par tirants et contre-rideaux ;

IMPLANTATION DES CAISSONS DU BRISE-LAMES SUD

Vue en plan



4

© ARCHIVES DU PORT DE FÉCAMP

- Le mur chasse-mer en maçonnerie d'environ 3 m de hauteur est démolit sur une quinzaine de mètres de long pour la création d'une rampe d'accès des engins au brise-lames ;
- Les parties d'ouvrages démolies sont reconstruites à l'identique après la mise en œuvre des fourreaux.

LES CONTRAINTES RELATIVES AU FRANCHISSEMENT DU CHENAL

Dans le chenal, d'une largeur d'environ 70 m :

- Les dragages d'entretien et l'éventualité d'un approfondissement futur du chenal nécessitent de creuser une tranchée d'une profondeur pouvant aller jusqu'à 3,50 m, afin

4- Implantation des caissons du brise-lames Sud - vue en plan.

5- Fonçage du caisson 11 - coupe après travaux.

6- Franchissement du caisson 11 - coupe.

4- Layout of the caissons of the southern breakwater - plan view.

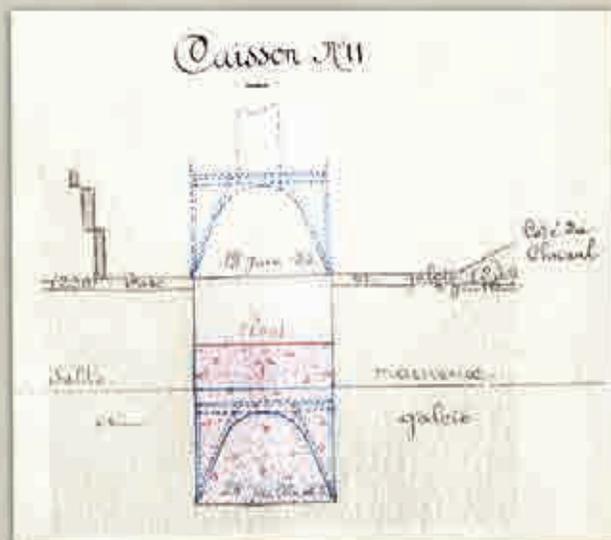
5- Caisson 11 sinking - cross section after works.

6- Passage through caisson 11 - cross section.

- de garantir l'absence de risque pour les opérations de dragage futures ;
- Les fourreaux sont protégés contre d'éventuelles actions mécaniques par des cavaliers en béton mis en œuvre après la pose des conduites ;
- Durant les travaux, le matériel nautique de l'entreprise ne doit pas occuper plus de la moitié de la largeur du chenal pour ne pas perturber la navigation des bateaux de pêche et de plaisance ;
- Les travaux ne doivent avoir aucun impact sur la navigation de commerce et le chenal doit également être totalement libéré de tout équipement nautique à chaque mouvement de navire de commerce (entrée/sortie) ;

FONÇAGE DU CAISSON 11

Coupe après travaux

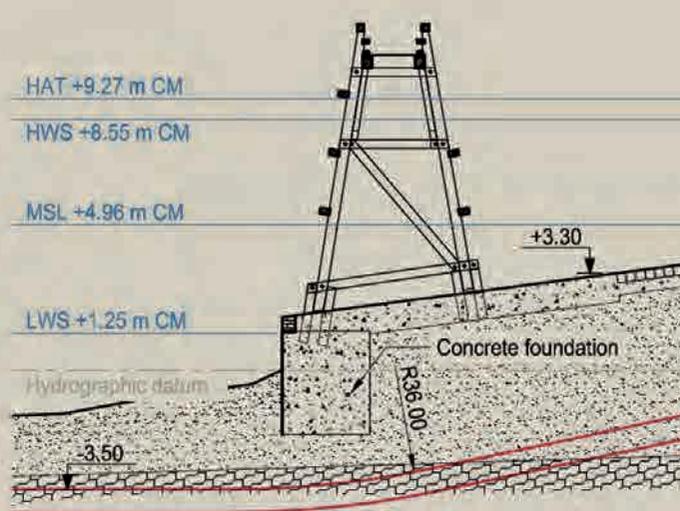


5

© ARCHIVES DU PORT DE FÉCAMP

FRANCHISSEMENT DU CAISSON 11

Coupe



6

© ARTELIA



7

© RTE

- Les travaux sont exposés aux houles ainsi qu'à des effets hydrodynamiques locaux à l'entrée du port, qui réduisent les périodes d'opérabilité du matériel nautique et des équipes de plongeurs ;
- Les courants de marée traversiers à l'approche du port contraignent les périodes de travaux maritimes à la sortie du port, en particulier pour la pose des fourreaux, des cavaliers et pour le tirage des câbles ;
- Pour minimiser les perturbations et éviter les incidents, une coordination est mise en place tout au long du chantier avec les autorités et les acteurs portuaires.

LES ÉTUDES

Les études de faisabilité technique de l'atterrage ont été réalisées par Setec en 2013-2014. Ensuite Artelia a réalisé en 2015 des études plus détaillées, de type *basic design* pour affiner le projet et établir les spécifications techniques pour le marché de conception-réalisation, confié par RTE à Prysmian PowerLink. C'est dans le cadre de ce marché qu'Abco Marine (sous-traitant génie-civil de Prysmian) a réalisé une campagne de reconnaissances géotechniques complémentaires en 2019, puis les études d'exécution en 2020-2021.

LES TRAVAUX SUR LE BRISE-LAMES

Pendant toute la durée des travaux, Artelia a assuré une mission d'assis-

7- Travaux d'installation de palplanches sur le brise-lames.

8- Travaux d'installation de palplanches en bas de brise-lames.

7- Work installing sheet piling on the breakwater.

8- Work installing sheet piling at the bottom of the breakwater.

tance à maîtrise d'ouvrage pour le compte de RTE. Ces travaux, conduits par Abco Marine, ont débuté fin février 2021 par la création de la rampe et la réalisation des tranchées en partie haute. Ces travaux sont réalisés par des moyens terrestres, à la marée haute. Ces travaux sont réalisés par des moyens terrestres, à la marée haute. Ces travaux sont réalisés par des moyens terrestres, à la marée haute.

Des moyens maritimes additionnels ont été utilisés pour la démolition du caisson de fondation du pied de perré. Abco a décidé de réaliser une démolition avec des pelles mécaniques munies d'un BRH, à terre et sur plateforme auto-élevatrice.

Les opérations en bas de perré ont duré plusieurs semaines avant de pouvoir finir l'installation du blindage (figure 8), du fait des contraintes de marée pour l'accès des engins en bas de perré et du bon état de la structure métallique ayant servi de coffrage au béton après 117 ans passés dans l'eau de mer.

LA PRÉFABRICATION DES FOURREAUX

La préfabrication des fourreaux en PEHD s'est déroulée dans le bassin Freycinet du port de Fécamp. Les tronçons de conduite étaient approvisionnés sur site et assemblés bout à bout par polyfusion en tronçons de plusieurs dizaines de mètres, puis stockés en flottaison dans le bassin.

Du fait des contraintes d'occupation des quais, Abco a finalement opté pour une préfabrication sur barge, permettant la mise en flottaison au fur et à mesure de l'assemblage.

Les tronçons étaient ensuite équipés de colliers de lestage constitués de 2 demi-coques en béton liaisonsées par boulons, mises en œuvre le long du quai de la Marne avec un espace-ment de 4,00 m.

LES TRAVAUX DANS LE CHENAL

Les travaux de dragage dans le chenal ont été réalisés à l'aide d'une pelle de grande capacité sur ponton flottant (*backhoe dredger* "Capall Mara"), et d'un chaland autofendable.



8

© ARTELIA



9

© RTE

Les matériaux extraits (sédiments, galets, graviers) ont été clapés en mer sur le site de dépôt réservé aux produits de dragage d'entretien du Port de Fécamp.

La souille a été contrôlée et entretenue jusqu'à la pose des fourreaux.

La mise en œuvre des fourreaux en flottaison requiert d'arrêter la navigation de pêche et de plaisance dans le chenal. Après avoir évalué différentes solutions de mise en œuvre et afin de minimiser les perturbations du trafic maritime, Abco a finalement opté pour mettre en œuvre 3 tronçons en flottaison :

- 1 tronçon de 275 m de longueur dans le chenal ;
- 2 tronçons de 50 m (1 par câble) sur la partie basse du brise-lames.

La mise en œuvre du tronçon principal présentait deux particularités :

- Dans le chenal, les deux fourreaux étaient liaisonnés et mis en œuvre simultanément ;
- Il fallait réaliser 2 courbures en flottaison, dont une relativement complexe, au niveau de la jonction entre le chenal et le brise-lames, du fait de la présence des ouvrages.

La pose du tronçon principal a eu lieu le 7 septembre 2021. Les tronçons ont été préalablement assemblés par brides en flottaison, dans le bassin Freycinet, puis remorqués à marée haute vers l'entrée du port (figure 1).

La descente contrôlée s'est faite à marée descendante, depuis l'extérieur du port vers le brise-lames (figure 9). Abco a mobilisé la plateforme auto-élévatrice, le ponton flottant, des

équipes de plongeurs ainsi que plusieurs navires pousseurs ; les autorités portuaires veillant à ce qu'aucun bateau de plaisance ne vienne perturber les opérations.

La descente a été contrôlée par des géomètres pendant toute l'opération et au final, la position des fourreaux était tout à fait conforme aux objectifs (figure 10).

Les 2 autres tronçons de 50 m de long ont été mis en place en flottaison sur le bas du perré entre les 20 et 22 septembre.

Les cavaliers sont ensuite mis en œuvre après l'installation des fourreaux à l'aide de la plateforme auto-élévatrice et de plongeurs. Tous les cavaliers n'ont pu être mis en place avant les

9- Mise en œuvre du tronçon principal des fourreaux.

10- Levé bathymétrique après la pose du tronçon principal des fourreaux.

9- Laying the main section of ducting.

10- Bathymetric survey after placing the main section of ducting.

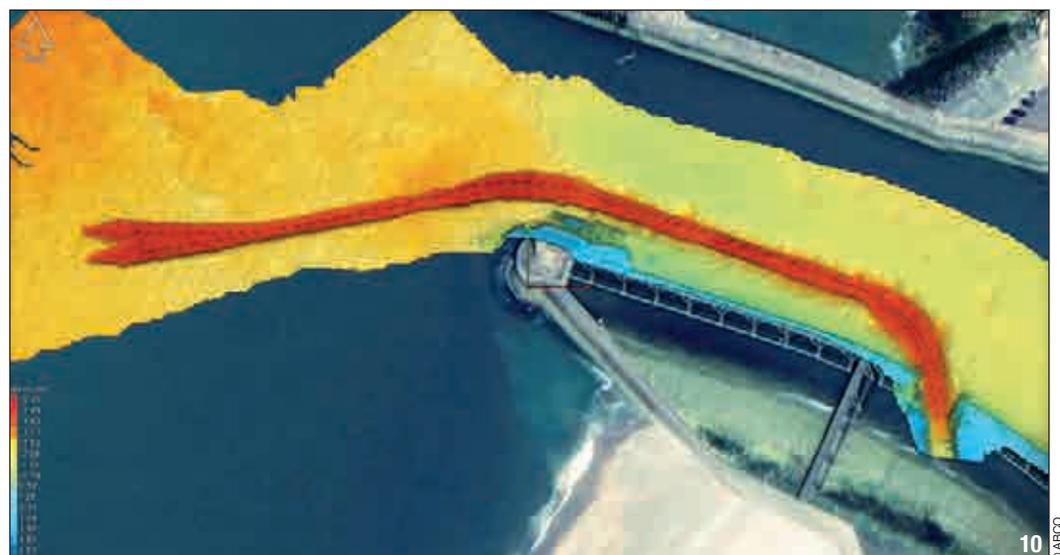
tirages de câbles. Ensuite les opérations ont été perturbées par le mauvais temps, nécessitant de reporter la fin de l'installation au printemps 2022.

LES CHAMBRES DE JONCTION D'ATERRAGE

Les chambres de jonction en béton armé ont été construites en septembre et octobre 2021, à l'intérieur d'un blindage en palplanches et à l'aide de béton coulé en place.

LES OPÉRATIONS DE TIRAGE DES CÂBLES

Les opérations de tirage des câbles ont eu lieu les 26 septembre et 16 octobre 2021, dans la continuité des travaux de génie-civil.



10

© ABCO



11

© RTE

C'est le "Cable Enterprise", navire câblé à positionnement dynamique de 124 m de long de Prysmian, qui a déroulé les câbles. Prysmian avait opté pour une solution de pose avec ensouillage simultané par charrue.

Lors du tirage à l'atterrage, le navire câblé était positionné à 600 m sur le tracé du câble. Il y avait environ 250 m de câble en flottaison entre le navire et l'extrémité en mer du fourreau.

La flottaison était assurée par des flotteurs mis en œuvre sur le navire au fur et à mesure du tirage, puis détachés par des plongeurs pour permettre la descente du câble dans le fourreau. En raison des forts courants de marée à l'approche du port, les opérations de plongée se limitaient à une durée de 3h autour des périodes d'étales.

Abco était en charge du tirage par treuil depuis la terre, ainsi que des opérations

11- Tirage du deuxième câble à l'atterrage.

11- Drawing the second cable at the landing.

maritimes et de plongée. L'opération mobilisait les mêmes moyens nautiques que pour la mise en œuvre des fourreaux (figure 11).

Compte tenu de la complexité du tirage avec ses 2 courbes à franchir et des efforts conséquents qui étaient attendus, un lubrifiant avait préalablement été mis en œuvre dans le fourreau, ce qui a permis de réduire sensiblement les efforts de tirage. Ainsi, les 2 tirages se sont déroulés sans la moindre difficulté. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LIAISON SOUS-MARINE : 17,5 km

CÂBLE HAUTE TENSION : tripolaire XLPE, diamètre 27 cm

FOURREAUX : 2 conduites en PEHD, diamètre 630 mm, longueur totale de 2 x 340 m

QUANTITÉS DRAGUÉES : 12 350 m³, longueur des tranchées marines 260 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Rte (Réseau de Transport d'Électricité)

ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE POUR LES TRAVAUX À L'ATTERRAGE : Artelia

COORDONNATEUR SPS : Dekra

ENTREPRISE TITULAIRE DU CONTRAT CLÉ EN MAIN : Prysmian Power Link

SOUS-TRAITANT EN CHARGE DES TRAVAUX À L'ATTERRAGE : Abco

ABSTRACT

LANDING WORKS FOR ELECTRICAL CONNECTION OF THE FECAMP OFFSHORE WIND FARM

YANN RENOUL, ARTELIA - VALENTIN MIGEON, RTE

The works for installation of the two undersea cables for electrical connection of the Fécamp offshore wind farm were performed by Prysmian Power Link in 2021 for RTE (Réseau de Transport d'Electricité). Abco was the contractor in charge of landing civil engineering works, located in the Fécamp Port entry channel. The project included, in particular, the installation of two 340-metre ducts for cable drawing, through old masonry structures and with a high level of concurrent work related to maritime traffic. The site constraints required a very special layout for the ducts, with two bends which increased the friction forces during cable drawing. □

LAS OBRAS EN EL PUNTO DE LLEGADA DE LA CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL PARQUE EÓLICO OFF-SHORE DE FECAMP

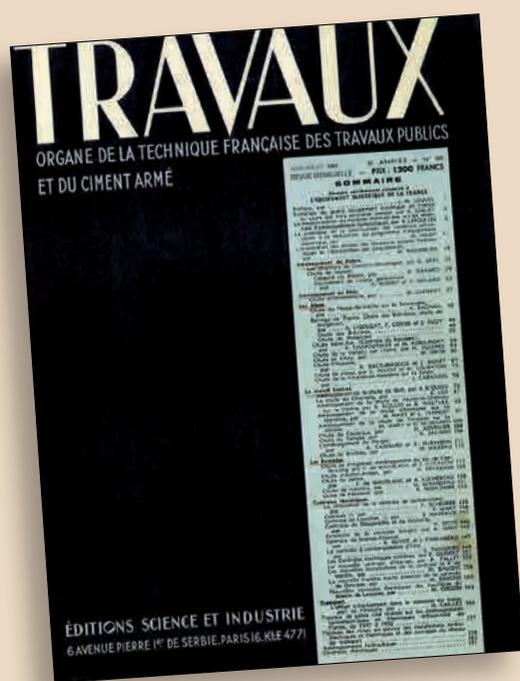
YANN RENOUL, ARTELIA - VALENTIN MIGEON, RTE

Las obras de instalación de los dos cables submarinos de la conexión eléctrica del parque eólico off-shore de Fécamp fueron llevadas a cabo por Prysmian Power Link en 2021 por cuenta de la compañía eléctrica francesa RTE (Réseau de Transport d'Electricité). La empresa Abco era la responsable de las obras de ingeniería civil en el punto de llegada, situado en el canal de entrada del puerto de Fécamp. El proyecto incluía, en particular, la instalación de dos conductos de 340 m para el tendido de los cables a través de las antiguas construcciones de mampostería, con una fuerte coactividad debida al tráfico marítimo. Las limitaciones del emplazamiento exigieron un trazado muy particular de los conductos, con numerosas curvas que aumentaban los esfuerzos de fricción durante el tendido de los cables. □

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : CHUTE DE MALGOVERT

PAR A. LIGOUZAT, F. COMBE, J. AUDY
TRAVAUX N°195 - JANVIER 1951

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR MICHEL MORGENTHALER



'aménagement hydroélectrique de l'Isère s'est développé au lendemain de la 2^e guerre mondiale, entre 1947 et 1954.

Il a commencé à l'amont, en Haute-Tarentaise (Savoie - France), entre Val-d'Isère et Bourg-Saint-Maurice dans un cadre exceptionnellement favorable : 1 000 m de dénivellée sur 20 km et un site de barrage idéal dans les quartzites du verrou glaciaire du Chevril. Le barrage du Chevril, encore appelé barrage de Tignes, voûte de 180 m de haut, 630 000 m³ de béton, est la pièce maîtresse de l'aménagement avec une retenue de 230 millions de m³ à 1 790 m d'altitude. C'est, à l'époque, le plus haut d'Europe et le troisième du monde. Au pied du barrage est construite la centrale des Brévières équipée de groupes Francis (95 MW, 145 GWh par an). De là part une galerie de

15 km de long complétée par une conduite forcée jusqu'à la centrale de Malgovert, équipée de groupes Pelton, qui turbine 50 m³/s sous une chute de 750 m, d'une puissance de 300 MW, produisant 660 GWh par an. L'article de 1951 expose entre autres les difficultés logistiques qui ont été affrontées par les constructeurs : pistes pour chenillettes et jeeps, téléphériques, cantonnements nécessaires pour une abondante main d'œuvre. Il faut se souvenir des noms des entreprises participantes, fameuses à l'époque dans l'épopée de la Houille Blanche en France et à l'étranger. Le génie civil et la galerie ont été réalisés par l'Entreprise Industrielle, la conduite forcée fournie par les Établissements Bouchayer et Viallet, les turbines par le consortium Neyret-Bellier-Schneider, les alternateurs par Alsthom. □

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: MALGOVERT WATERFALL

TRAVAUX No. 195 - JANUARY 1951

A. LIGOUZAT - F. COMBE - J. AUDY

The Isère hydroelectric power scheme was developed following the second world war, between 1947 and 1954. It started upstream, in the Haute-Tarentaise region (Savoie, France), between Val-d'Isère and Bourg-Saint-Maurice, in an exceptionally favourable environment: 1,000 metres difference in altitude over 20 km and an ideal dam site in the quartzites of the Chevril glacial rock bar. The Chevril Dam, still called the Tignes Dam, with an arch 180 m high, contains 630,000 m³ of concrete. It is the cornerstone of the development scheme, with a 230 million m³ reservoir at an altitude of 1,790 metres. At the time, it was the highest in Europe and third-highest in the world. At the base of the dam was built the Brévières power station, equipped with Francis turbines (95 MW, 145 GWh per year). From there runs a gallery 15 km long together with a penstock as far as the Malgovert power station, equipped with Pelton wheels, churning 50 m³/s under a water head of 750 metres, with a capacity of 300 MW, producing 660 GWh per year. The 1951 article describes, in particular, the logistical problems faced by the builders: tracks for tracked vehicles and jeeps, cableways, and construction camps needed for the big workforce. It is worth remembering the names of the firms taking part, which were famous at this time of major hydropower development in France and abroad. The civil works and the gallery were executed by Entreprise Industrielle, the penstock was supplied by Établissements Bouchayer et Viallet, the turbines by the Neyret-Bellier-Schneider consortium, and the generators by Alsthom. □

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: LA CAÍDA DE MALGOVERT

TRAVAUX N°195 - ENERO DE 1951

A. LIGOUZAT - F. COMBE - J. AUDY

El aprovechamiento hidroeléctrico del Isère se desarrolló después de la Segunda Guerra Mundial, entre 1947 y 1954. Empezó aguas arriba, en Haute-Tarentaise (Savoie, Francia), entre Val-d'Isère y Bourg-Saint-Maurice, en un marco excepcionalmente favorable: 1.000 m de desnivel a lo largo de 20 km y una zona de presa ideal en las cuarcitas del umbral glacial de Chevril. La presa de Chevril, también conocida como presa de Tignes (arco de 180 m de altura, 630.000 m³ de hormigón), es el elemento central del proyecto, con un embalse de 230 millones de m³ a 1.790 m de altitud. En aquella época, era el más elevado de Europa y el tercero del mundo. Al pie de la presa se construyó la central de Brévières, provista de grupos Francis (95 MW, 145 GWh al año). De ahí parte una galería de 15 km de longitud, completada por un conducto forzado hasta la central de Malgovert, provista de grupos Pelton, que turbinan 50 m³/s bajo una caída de 750 m, con una potencia de 300 MW, que produce 660 GWh al año. El artículo de 1951 expone, entre otros aspectos, las dificultades logísticas a las que tuvieron que hacer frente los constructores: pistas para tractores oruga y jeeps, teleféricos, acantonamientos necesarios para una mano de obra abundante. Merece la pena recordar los nombres de las empresas participantes, famosas en la época de la Houille Blanche en Francia y en el extranjero. La ingeniería civil y la galería fueron obra de Entreprise Industrielle, el conducto forzado fue suministrado por Établissements Bouchayer et Viallet, las turbinas, por el consorcio Neyret-Bellier-Schneider, y los alternadores, por Alsthom. □

Chute de Malgovert

Les installations de chantier.

La chute de Malgovert a pris la suite de la chute de la Gurraz dont les travaux ont commencé avant la guerre de 1939-1945. En 1936 le barrage et la prise d'eau ont été construits, cette réalisation apportant immédiatement à la centrale de Vieclair un apport de réserve intéressant.

En 1941 ont été attaqués les travaux de perforation de la galerie d'amenée. Au début de 1947, toutes les installations entre la prise d'eau et la fenêtre 9 étaient déjà en place.

L'effectif était à cette époque de 700 hommes. Le développement du chantier et l'augmentation des effectifs jusqu'à 2 300 hommes en 1949 ont exigé la construction de cités provisoires nombreuses, les possibilités de logement chez l'habitant étant très faibles.

Actuellement les logements ont été construits pour un effectif de plus de 1 500 célibataires et 275 ménages, répartis entre 13 cités.

Les plus importantes sont :

la cité de Malgovert construite presque entièrement en préfabriqué à éléments de béton ;

la cité de Courbaton. Cette cité, de par sa position en altitude (1 500 m), a été conçue pour une utilisation ultérieure en colonies de vacances pour les enfants du personnel R.D.F. Elle est particulièrement soignée.

La galerie de Malgovert se développe sur la rive gauche de l'Isère, dans les contreforts du massif du mont Pourri. La route nationale 202 qui longe la vallée, d'ailleurs dans le fond de celle-ci, n'est que très rarement raccordée à la rive droite par des chemins accessibles aux véhicules. L'accès aux différentes fenêtres d'attaque a donc nécessité des moyens d'accès complémentaires :

la fenêtre 9 est desservie par un téléphérique mixte à personnel et à matériel depuis le village de la Raie. Ce téléphérique de 700 kg de charge utile s'étend sur une longueur de 540 m avec une dénivellation de 100 m ;

la fenêtre 11 est desservie par un téléphérique de 500 kg pour les matériaux ;

la fenêtre 13 n'est accessible au personnel que par jeep ou chenillette. En ce qui concerne le matériel, un

câble de service établi entre le hameau de la Roche et la fenêtre 2 a permis jusqu'à ce jour l'alimentation normale de ce chantier. Au moment où sera attaqué le revêtement de la galerie, la fenêtre 13 sera équipée de deux téléphériques, l'un amenant les agrégats depuis une ballastière installée dans l'Isère au lieu dit « le Champet », l'autre amenant le ciment stocké dans les silos d'une station relais de déchargement établie au hameau du Miroir sur le trajet du téléphérique monocâble Bourg-Saint-Maurice-les-Boisses (voir aménagement de la chute des Brévières) ;

la fenêtre 14 est desservie par un téléphérique mixte à personnel et matériel, de 2 T de charge utile, installé en 1949 ;

la fenêtre 16, à Courbaton, est accessible par route depuis Bourg-Saint-Maurice.

Le chantier de la centrale et du poste sont d'accès facile, encore a-t-il fallu construire une route de près de 3 km se raccordant à la R.N. 202 à partir du village de Séez.

Sur l'ensemble du chantier on exploite une carrière et deux ballastières :

la carrière de la fenêtre 5, destinée à pourvoir en agrégats le béton de revêtement de la galerie d'amenée entre la prise d'eau et la fenêtre 13 ;

la ballastière du Champet, destinée au tronçon F.11-F.14 ;

la ballastière des Eulets, destinée à l'usine, la conduite forcée et ses annexes, la galerie entre F.14 et F.16 et la cheminée d'équilibre.

L'alimentation du chantier en ciment est assurée aux points suivants :

la fenêtre 5, à proximité de laquelle est installée une station de déchargement et stockage sur le trajet du téléphérique à monocâble Bourg-les-Boisses ;

la fenêtre 13, où est installée la station d'arrivée du téléphérique bicâble de 10 T/h dérivé depuis le hameau du Miroir ;

la centrale 00 est installée également une station de déchargement et stockage comme à la fenêtre 5.

Le ciment provient d'origines diverses. Cependant, des quantités importantes viendront d'une cimenterie de Pagny-sur-Meuse et, pour cette fourniture, des rames navettes sont prévues entre la cimenterie et la gare de Bourg-Saint-Maurice.

Pour l'exécution des revêtements de ga-



Fig. 1. — Le village de la Raie vu du téléphérique de la fenêtre 9.



(Photo Mauchain-Périllon.)

Fig. 2. — Avancement en pleine section au « Jumbo ».



(Photo Mauchain-Périllon.)

Fig. 3. — Avancement en demi-section : palotte avec soutèvements métalliques.

lerie, les agrégats sont amenés depuis la fenêtre, et le béton est préparé sur le lieu d'utilisation. Il est mis en place à l'aide d'appareils pneumatiques « Johnny », refoulant derrière des coffrages métalliques « Blaw-Knox ».

Des dispositifs plus puissants seront mis en fonctionnement en 1950 pour le bétonnage de la section de la galerie entre la P 11 et la cheminée d'équilibre.

La préparation des agrégats se fait dans des stations de concassage aménagées à proximité des deux points de produc-

tion principaux (P 5 et Champet). La granulométrie comporte trois échelles : 0/5, 5/15 et 15/60.

À la centrale, le béton est préparé dans une usine à béton spéciale faisant corps avec la station de criblage-corréction-lavage des Eulets. Les agrégats roulés extraits de la ballastière des Eulets par une dragneline « Haulotte » de 30 T ; ils sont conduits dans les silos de la station de concassage, silos au nombre de cinq pour les catégories 0-5, 3-10, 10-30, 30-50 et 50-150. L'équipement de correction comprend deux concasseurs giratoires « Kennedy » (K 37 et K 2), et deux broyeurs à cylindres. On produit ainsi la granulométrie 0-5, 5-10, 10-30 et 30-50. Le ciment, de son côté, amené pneumatiquement depuis la station de déchargement-stockage de Malgovert, est stocké dans deux silos identiques.

Les deux bétonnières, de 1 500 l, sont alimentées par un tapis convoyeur circulant à la base des silos et chargé par l'intermédiaire de doseurs. La mise en place du béton à l'usine est manuelle pour le gros œuvre et pneumatique (pompe « Almacoa » 10 m³ ; s) pour les bétons armés.

L'alimentation électrique du chantier est assurée par le poste de l'usine de Viclaire d'où partent deux lignes à 15 000 V dont l'une à deux ternes 43 mm² cuivre suit la route nationale 202 pour aboutir à Malgovert, tandis que l'autre, simple, 28 mm² cuivre, dessert les fenêtres d'attaque de P 13 à Courbaton. Une boucle Courbaton-Malgovert, en ligne simple 28 mm² cuivre, assure la sécurité.

La puissance totale installée s'élève à 10 000 kVA.

Les ouvrages définitifs.

Le barrage est du type mobile à vannes levantes et comporte deux pertuis de 5 m et un pertuis de 2 m. Il est prévu pour l'évacuation de crues de 186 m³ / s.

La prise d'eau construite en 1936 n'était conçue que pour un débit de 30 m³ / s. Les modifications sont prévues pour permettre un débit de 50 m³ / s.

Le bassin de retenue créé pour le barrage dans la plaine des Brévières est d'une capacité de 188 500 m³ dont 180 000 m³ utiles.



(Photo Mauchain-Périllon.)

Fig. 4. — Avancement en demi-section. Abattage du stross.

La galerie d'aménée établie entièrement sur la rive gauche de l'Isère atteindra une longueur de 75 km environ. Il est prévu deux profils type :

un profil en fer à cheval de 16,38 m² de section, en bon rocher ;

un profil circulaire de 16,25 m² de section, en mauvais rocher.

Elle sera entièrement revêtue sur toute sa longueur.

On applique à la perforation un grand nombre de méthodes et d'engins. On peut cependant dégager certains modes de travail prédominant :

entre F.7 et F.11 — galerie d'avancement en 5 m² abatages calotte en 10 m², stross en 6 m², réglages variables ;

à F.11 aval — galerie d'avancement calotte 11 m², stross en 10 m², réglages en 5 à 6 m² ;

F.13 et F.16 — galerie pleine section 27 m avec soutènements métalliques, perforation avec « Jumbo » à huit marteaux D.A. 35 formant « Cheery-Picker », tir électrique, marinage par pelle « Conway » 75, wagornets « Western » 5 C.V. et tracteurs jumelés W.3 électriques.

Des difficultés particulières se sont présentées aux environs de la F.13 : une première fenêtre est attaquée en décembre 1946, en galerie d'avancement de 5 m². Après un éboulement avec effondrement du terrain de couverture à une douzaine de mètres de l'entrée, c'est, au P.K. 130 m, une arrivée subite en galerie d'une coulée de sable et d'eau en provenance d'une zone de quartzites broyées. Il fallut abandonner cette attaque. Une nouvelle fenêtre, située plus en aval, est attaquée le 30 juin 1947. Après 100 m on commence les amorces amont et aval pour rejoindre le tracé théorique de la galerie. Au P.K. 131,70 se produit une coulée identique à la première, ce qui oblige à un nouveau changement de direction. On décida, après sondages, de s'enfoncer profondément dans la montagne, en prolongement de la nouvelle fenêtre. Malheureusement, après une prolongation jusqu'au P.K. 230, une tentative en direction de l'amont se heurta après quelques mètres à la même difficulté.

Les sondages exécutés en grand nombre à partir de la surface même permirent de délimiter la zone dangereuse. Le tracé obtenu montra que de toute façon on ne pouvait éviter de traverser 50 à 60 m de sables broyés, gorgés d'eau, inclus entre les deux massifs de terrains houillers dans lesquels se développait le reste de la galerie.

Il fut alors décidé sans plus tarder d'attaquer une nouvelle fenêtre F.12 qui, avec la F.13, délimitait convenablement la partie difficile à franchir et, en attendant la mise au point de procédés spéciaux concernant l'exécution de la galerie entre F.12 et F.13 sur une longueur de 100 m environ, de continuer la perforation par les procédés habituels de F.12 vers F.11 et de F.13 vers la F.16.

Il a été en particulier tenté des essais de stabilisation du sol par injection de ciment depuis l'extérieur. Les résultats ont été négatifs. Actuellement on procède à des injections depuis l'intérieur de la galerie. Au mois de décembre 1949, on a repris en direction de la zone dangereuse la perforation en galerie d'avancement en calotte de 11 m².

Sur l'ensemble du chantier utilisant des galeries de grande section on a généralisé l'emploi de soutènements métalliques. Ces soutènements, malgré leur forte section et le soin apporté dans les assemblages de leurs différents éléments sont cependant insuffisants dans certains cas pour supporter la poussée des terrains et l'espacement normal de 1,25 m doit souvent être réduit de moitié ou des deux tiers.

La cheminée d'équilibre est constituée par un puits cylindrique vertical de 18 m de diamètre intérieur, avec un revêtement de béton de 1 m d'épaisseur. À la partie supérieure, un évasement porte le diamètre intérieur à 30 m. À la partie inférieure, un étranglement sépare la galerie de la cheminée. La cheminée est non déversante même pour une coupure du débit total maximum de la galerie.



Fig. 5. — Vue de la cheminée d'équilibre prise de bas en haut.

(Photo Monchassin-Péthibon.)

Les fouilles ont été exécutées en 1948-1949 et ont comporté deux phases suivant une méthode d'ailleurs très classique en ce qui concerne ce genre d'ouvrage :

- a) perforation d'un avant-puits de 9 m² ;
- b) élargissement en 310 m².

Les abatages d'élargissement se font par anneaux successifs de 6 m, chaque anneau étant revêtu immédiatement d'un béton de sécurité de 0,50 m d'épaisseur.

Une galerie blindée assure la liaison hydraulique entre la cheminée d'équilibre et le départ des conduites forcées. Sa longueur est de 305 m et son diamètre 3,30 m. Sa longueur a été fixée par les conditions topographiques et géologiques, étant donné que la cheminée d'équilibre et le point haut des conduites forcées étaient rigidement définis.

Deux conduites forcées constituées par des tuyaux auto-frettés, en longueur de 10 m maximum, sont en cours de montage. La partie supérieure aura 2,20 m de diamètre intérieur et utilisera des tuyaux TAF, avec paroi tôle à 54 kg et frettes en élingues à fils câbles à 200 kg. La partie inférieure aura 2,10 m de diamètre intérieur et utilisera des tuyaux TAF avec paroi tôle à 54 kg et frettes laminées à 115 kg.

Toutes les viroles seront soudées sur place, bout à bout, sur couvre-joints extérieur. L'épaisseur de la tôle variera de 10 à 17 mm entre le haut et le bas.

Les longueurs respectives totales des deux conduites sont 1 727 m et 1 740 m.

Installées dans une tranchée en forêt de Malgovert, avec un entraxe de 3,50 m, elles reposeront sur une série de piliers supports en béton avec berceau métallique (un pilier par virole). Leur ancrage sera assuré par seize massifs de béton.

Toutes les fouilles et tous les décroctages sont terminés. Le bétonnage des massifs inférieurs est terminé ; le montage des conduites forcées commencera incessamment.

L'usine est un bâtiment rectangulaire de 125 m × 48 m × 18 m complétée, au-dessus des canaux de fuite, par une plateforme supportant les transformateurs de puissance.

Les fouilles ont été exécutées en plusieurs étapes.

L'Isère a tout d'abord été dérivée dans une tranchée creusée à pleine fouille à l'emplacement de la salle des vanes.

Après dérivation, le lit ancien a été mis à sec à l'abri de deux batardeaux en gabions, l'un à l'amont et l'autre à l'aval. En même temps commençaient les fouilles de l'usine à l'abri de rideaux de palplanches métalliques isolant en deux enceintes l'emplacement des canaux de fuite des turbines.

Lorsque le battage de ces palplanches d'isolement fut terminé, on restitua les eaux de l'Isère à leur ancien lit aménagé et Pon prolongea le rideau de palplanches métalliques à l'amont jusqu'à la montagne de façon à protéger complètement l'emplacement de l'usine.

Enfin, après exécution complète des canaux de fuite (fouilles et bétonnage) on mit en place en bout de ces canaux des batardeaux provisoires en bois, ce qui permit l'arrachage des palplanches d'isolement tout en conservant la protection des fouilles de l'usine.

La photographie ci-dessous montre l'état d'avancement des travaux de l'usine fin mai 1950.

Il est prévu qu'à fin 1951 la galerie sera entièrement terminée, ainsi que l'usine. Le premier des quatre groupes sera installé à cette même époque, avec raccordement au réseau en février 1952. Les trois autres groupes seront installés progressivement et raccordés au réseau, l'ensemble étant achevé au milieu de l'année 1953.

Entreprises et constructeurs.

Le principal des travaux de génie civil pour la galerie et l'usine a été confié à l'Entreprise Industrielle.

La conduite forcée provient des Etablissements Bouchayer et Viallet. Les turbines seront fournies par le consortium Neyret-Beylier-Schneider, et les alternateurs par la Société Abthom. Les transformateurs seront fournis par la Société Savoisiennne de Constructions Electriques.

A. LAGOUZAT, F. COMBE, J. AUDY.



(Photo: Monsieur Portillon.)

Fig. 6. — La tranchée de la conduite forcée en forêt de Malgoveri.

