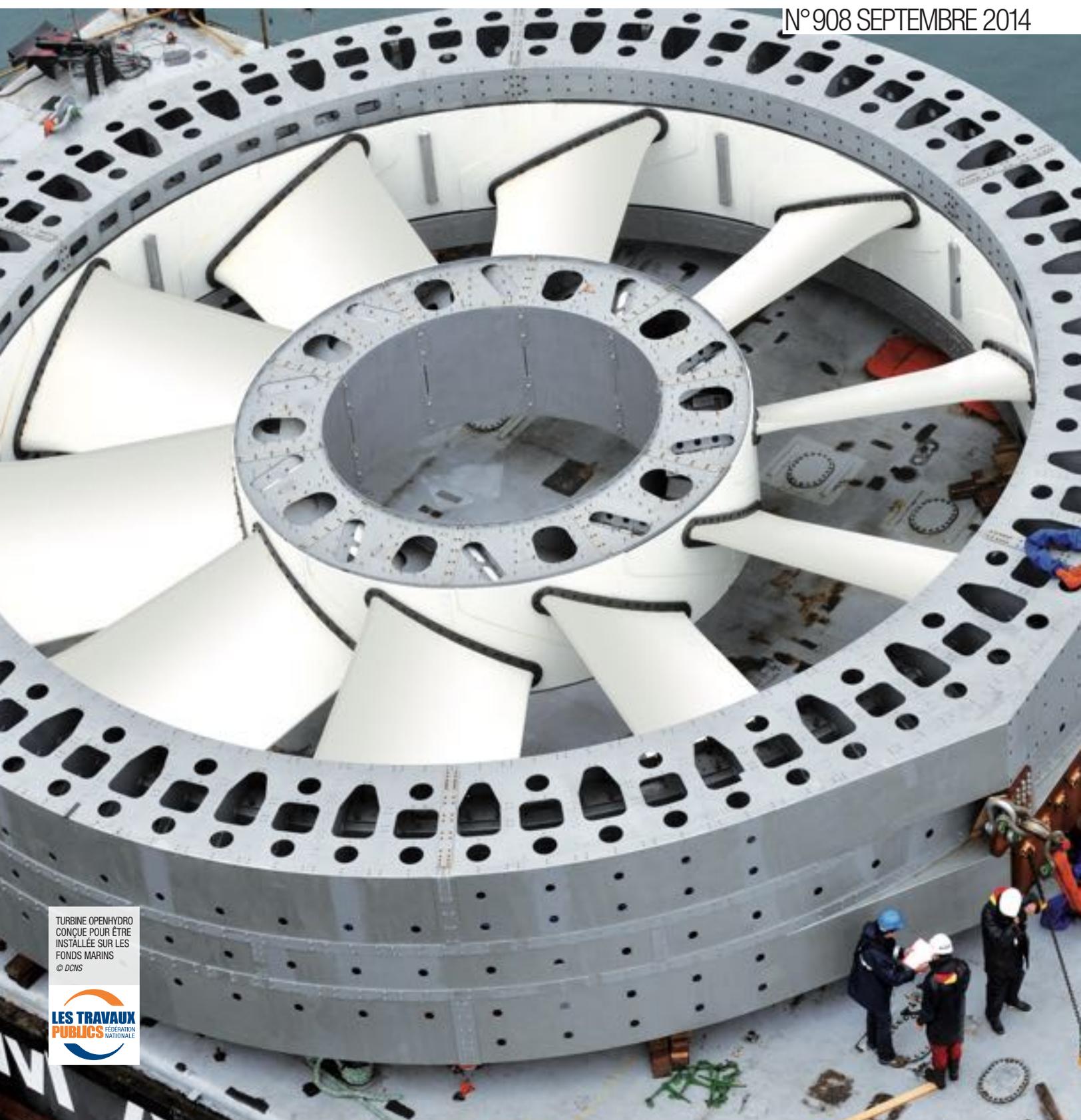


TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

ENERGIE - DEVELOPPEMENT DURABLE. TERMINAL METHANIER DE DUNKERQUE. USAN : UN CHAMP PETROLIER EN EAUX PROFONDES AU NIGERIA. LE REACTEUR DE RECHERCHE NUCLEAIRE JULES HOROWITZ. LES TABLEAUX BASSE TENSION DE LA CENTRALE EPR DE FLAMANVILLE. PROJET NATIONAL EMACOP. LES HYDROCARBURES DE ROCHE-MERE. CAPTAGE GEOTHERMIQUE EN PAROIS MOULEES. LES PARCS EOLIENS. TRESORS DE NOS ARCHIVES : LA CENTRALE DE FESSENHEIM

N°908 SEPTEMBRE 2014



TURBINE OPENHYDRO
CONÇUE POUR ÊTRE
INSTALLÉE SUR LES
FONDS MARINS
© DCNS

**LES TRAVAUX
PUBLICS**
FÉDÉRATION
NATIONALE

Ensemble, allons plus loin !



Solide et fiable, le Groupe SMA,
premier assureur du secteur du BTP,
s'ouvre à tous les professionnels,
dirigeants, collaborateurs et leur famille.

L'écoute, la proximité
et l'accompagnement de nos clients,
la capacité d'innovation et la pérennité
sont les atouts qui font notre différence.

Chaque jour, notre expertise
nous conduit plus loin pour vous assurer.

SMA

www.groupe-sma.fr

Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fntp.fr**Comité de rédaction**
Hélène Abel (Ingérop), David
Berthier (Vinci Construction France),
Jean-Bernard Detry (Setec), Philippe
Gotteland (Fntp), Jean-Christophe
Goux-Reverchon (Fntp), Laurent
Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar
(Eiffage TP), Florent Imberty
(Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis),
Louis Marracci (Bouygues TP),
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),
Jacques Robert (Arcadis), Claude
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion
(Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)**Ont collaboré à ce numéro**
Rédaction
Monique Trancart, Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copemic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.frFrance (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité**
Rive Média
2, rue du Roule - 75001 Paris
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44
contact@rive-media.fr
www.rive-media.fr**Directeurs de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr
Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05
c.reinger@rive-media.fr**Site internet :** www.revue-travaux.com**Édition déléguée**
Com'1 évidence
Siège :
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.comLa revue Travaux s'attache, pour l'information
de ses lecteurs, à permettre l'expression de
toutes les opinions scientifiques et techniques.
Mais les articles sont publiés sous la
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur
se réserve le droit de refuser toute insertion,
jugée contraire aux intérêts de la publication.Tous droits de reproduction, adaptation, totale
ou partielle, France et étranger, sous quelque
forme que ce soit, sont expressément réservés
(copyright by Travaux). Ouvrage protégé ;
photocopie interdite, même partielle
(loi du 11 mars 1957), qui constituerait
contrefaçon (code pénal, article 425).Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

ÉNERGIES : INVENTER NOTRE FUTUR



© DR

L'Énergie, ou plutôt les Énergies sont au cœur de tous les débats, tant économiques que politiques de ce début du 21^e siècle. Les choix qui seront prochainement faits impacteront nos consommations, nos usages, nos méthodes de production, nos systèmes de pilotage et de régulation et donc nos métiers de constructeurs et d'exploitants.

Dans ce contexte à évolution rapide, nous pouvons distinguer trois enjeux essentiels. Le premier touche à une décision politique, celle du mix énergétique qui sera le nôtre à l'horizon 2025. Ce choix de mix, qui tendra nécessairement à un modèle décarboné, impacterà les installations de production existantes en particulier nos installations nucléaires, avec des travaux de prolongement de durée d'exploitation et des travaux sur des installations nouvelles type photovoltaïques, éoliennes, hydroliennes ou biomasses.

Le deuxième touchera à l'efficacité énergétique de nos logements, de nos bureaux, de

nos bâtiments administratifs et de nos sites industriels. Nous sommes tous des "Consommateurs", nos usages et nos environnements de vie et de travail évolueront et nécessiteront des travaux d'isolation, d'amélioration de la performance énergétique et de régulation sans bien sûr oublier le confort d'utilisation. Enfin, un dernier enjeu technologique majeur dessinera le paysage énergétique de demain avec un rôle toujours plus important du numérique dans nos installations de production, de transport et de régulation. Nous pourrions contrôler, superviser, stocker, effacer, optimiser nos séquences de production, de consommation et d'exploitation avec des outils de plus en plus puissants travaillant en temps réel. L'interopérabilité des réseaux deviendra une réalité et permettra de sécuriser les approvisionnements et de créer à terme, avec une libéralisation accrue, des échanges dynamiques d'énergie. Nous pourrions être alternativement des consommateurs ou des producteurs, avec des pas de temps toujours plus courts.

Ces enjeux continueront à rendre notre métier d'Ingénieur toujours plus passionnant avec de nouveaux challenges technologiques que nous sauront relever.

JEAN-PHILIPPE TRIN
PRÉSIDENT DIRECTEUR GÉNÉRAL
BOUYGUES ENERGIES & SERVICES



ENERGIE

DEVELOPPEMENT

DURABLE

USAN - L'INSTALLATION D'UN CHAMP PETROLIER EN EAUX PROFONDES AU NIGERIA © SAPEM





04 ALBUM

08 ACTUALITÉ



**ENTRETIEN AVEC
REMI DORVAL**
VOYAGE AU CENTRE
DE LA TERRE



**ENTRETIEN AVEC
ALAIN LECOMTE**
SOLAR DECATHLON :
L'HABITAT SOLAIRE
AU PAYS DU ROI SOLEIL

24 DCNS : LA MER EST L'AVENIR DE L'HOMME



RÉSERVOIRS GNL
du terminal méthanier
de Dunkerque



**USAN : L'INSTALLATION
D'UN CHAMP PÉTROLIER
EN EAUX PROFONDES**
au Nigéria



**INVESTISSEMENT D'AVENIR
ET PROUESSE TECHNIQUE**
Le réacteur de recherche nucléaire
Jules Horowitz



**CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES TABLEAUX
BASSE TENSION**
de la centrale EPR de Flamanville



**RÉCUPÉRATION DES ÉNERGIES
MARINES PAR DISPOSITIFS HOULOMOTEURS**
Un volet du projet national
EMACOP



**LES HYDROCARBURES
DE ROCHE-MÈRE**
Un avenir à construire



**CAPTAGE GÉOTHERMIQUE
EN PAROIS MOULÉES**
de stations de métro



**CONCEPTION
ET CONSTRUCTION
DES PARCS ÉOLIENS**
du terrestre à l'offshore



**TRÉSORS DE NOS ARCHIVES :
L'EXÉCUTION DU GÉNIE CIVIL
DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE
DE FESSENHEIM**
Numéro 476 - novembre 1974





L'ALBUM

ÉOLIENNES GIGANTESQUES ET LOGISTIQUE À LA MESURE

LA réalisation d'un parc éolien réunit différents acteurs : le génie civil pour les fondations, les compagnies électriques pour les réseaux, les transporteurs pour l'approvisionnement des machines et les installateurs pour le montage des aérogénérateurs. La filière éolienne terrestre vise des machines de puissance au moins égale à 3 MW et de hauteur en haut de pale de 200 m et plus. En filière offshore, la fondation est souvent constituée d'un monopieu de 6 m de diamètre, battu ou foré. La logistique doit tenir compte d'accès difficiles. (voir article page 76).



© EDF ENERGIES NOUVELLES





L'ALBUM

RÉACTEUR DE RECHERCHE **JULES HOROWITZ** À CADARACHE

RJH est le nom du Réacteur Jules Horowitz, construit à Cadarache, qui est l'outil dont se dotent le CEA et ses partenaires européens pour prendre la suite du réacteur Osiris. C'est le seul réacteur de recherche actuellement en construction en Europe. Razel-Bec en réalise l'ensemble du génie civil dans un contexte de contrôle très rigoureux. Pour la première fois dans l'industrie nucléaire, sont mis en œuvre des bétons lourds réunissant différentes caractéristiques difficilement conciliables. (voir article page 44).



© JÉRÔME CABANEL

© NICOLAS VERCELLINO

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : UN PROJET DE LOI QUI MET EN MOUVEMENT

Le projet de loi sur le nouveau modèle énergétique français entend faire basculer le pays dans une dynamique économique basée sur l'énergie.



La Caisse des dépôts va prêter 5 milliards d'euros aux collectivités locales.

L'impulsion est là : Ségolène Royal, ministre de l'Écologie, veut mettre la France en mouvement à travers son projet de loi de programmation sur la transition énergétique dont le Parlement doit encore débattre. « C'est une loi d'action et de mobilisation », a-t-elle souligné lors de sa présentation.

La ministre veut que chacun s'en saisisse à son niveau. Pour elle, la transition signifie « aller vers une meilleure situation, savoir comment agir, s'engager et bénéficier du nouveau modèle. » Il faut tout faire contre le réchauffement climatique, a-t-elle insisté, et la responsabilité en est collective.

La démarche doit améliorer la vie quotidienne de chacun, donner du pouvoir d'achat par les économies d'énergie, créer des emplois (100 000), bénéficier à notre santé. Bref, « donner de l'espoir aux Français. »

"Transition énergétique" vaut presque "transition écologique" tant le projet déborde le seul domaine énergétique avec la réduction des gaz à effet de serre, la qualité de l'air et l'économie circulaire. L'article 57 propose d'instaurer un plan climat air énergie territorial.

→ **400 millions en faveur des collèges**
Le projet s'accompagne de nouvelles mesures de financement exposées lors de la conférence bancaire et financière⁽¹⁾. « L'investissement énergétique ne coûte pas, a affirmé la ministre. Il crée de l'activité, les cotisations rentrent, les factures baissent. Je fais en sorte que la demande de travaux soit solvable. » L'État a débloqué avec la Caisse des dépôts 5 milliards

d'euros en prêts "transition énergétique et croissance verte" destinés aux collectivités locales. La Banque européenne d'investissement a annoncé qu'elle engagerait 400 millions d'euros dans la rénovation de collèges.

La loi rappelle la priorité à donner aux économies d'énergie.

En 2050, la consommation d'énergie devra avoir baissé de moitié. La quantité d'énergies fossiles dont l'importation coûte 65 milliards d'euros par an, sera réduite de 30 % en 2030.

En matière de production, le projet de loi définit, selon Ségolène Royal, « le cheminement pour abaisser à 50 % la part du nucléaire dans la production d'électricité (75 % aujourd'hui) en 2025. Je ne veux pas qu'il y ait d'opposition entre les différentes sources d'énergie », a-t-elle répété. La part des renouvelables sera de 40 % en 2030, hydraulique comprise.

→ **Service public communal de chaleur**

La chaleur consommée proviendra à 38 % de la biomasse (bois), de la valorisation des déchets et de la géothermie. Le biogaz et l'hydrogène fourniront 15 % des carburants.

La ministre aimerait que 50 % des véhicules de l'État marchent à l'électricité. Les emplacements de recharge seront multipliés. Les émissions de gaz à effet de serre devront descendre de 40 %. Pour doubler la production d'énergies

renouvelables, plusieurs dispositions seront prises.

Le fonds chaleur sera multiplié par deux progressivement sur trois ans.

L'article 59 du projet de loi reconnaît « un service public communal de chaleur et de froid (...) dans l'optique de développer la partie d'énergie renouvelable et de récupération dans les réseaux de chaleur et de froid. »

Des appels d'offres pour 1 500 méthaneurs et sur l'injection du biogaz dans le réseau de gaz vont être lancés. Les procédures administratives d'installations en énergies nouvelles seront raccourcies afin d'en diminuer le coût. Les habitants pourront investir dans ces projets.

→ **Photovoltaïque de nouvelle génération**

Un appel d'offres photovoltaïque de grande puissance verra le jour cet été. Les gros consommateurs - surfaces commerciales - seront incités à installer de tels capteurs. Des centrales au sol seront implantées sur des terrains pollués.

La recherche et l'innovation sont au programme avec de futurs appels à manifestation d'intérêt (AMI) sur le photovoltaïque nouvelle génération, l'éolien, le froid renouvelable et le solaire thermique. ■

⁽¹⁾ Avec Michel Sapin, ministre des Finances. Voir le site du ministère de l'Écologie, rubrique Énergie, actualité du 23 juin.

AGRÉMENT DES SOCIÉTÉS DE TIERS FINANCEMENT

La Région Rhône-Alpes investit 10 millions dans deux sociétés de tiers financement, l'une pour économiser l'énergie, l'autre en faveur des énergies renouvelables. Ainsi devance-t-elle le projet de loi de programmation pour la transition énergétique qui prévoit d'instaurer leur agrément.

La Société publique locale d'efficacité énergétique en France a été créée fin 2012 avec dix collectivités de Rhône-Alpes. Dotée de 5,3 millions d'euros dont 5 apportés par la Région, elle s'endette en lieu et place des collectivités.

Elle pourra aider au financement de 17 opérations sur le patrimoine territorial, soit un montant de travaux estimé à 50 millions sur trois ans dont 20 affectés

à la rénovation des lycées. Premiers projets sélectionnés d'ici à fin 2014.

→ **Société de capital risque**

Fin 2013, la Région a mis sur pied un fonds d'investissement qui viendra renforcer les fonds propres des porteurs de projet de production d'énergies renouvelables, ce qui facilitera leur accès aux emprunts bancaires. La société de capital risque baptisée Oser va gérer 9,5 millions d'euros : 5 de la Région et le reste des banques et d'autres financeurs privés. Une quinzaine de projets pourront être aidés en trois ans, notamment ceux adossés à des gisements d'énergie peu exploités en Rhône-Alpes : méthanisation, fermes éoliennes, toits éoliens industriels, micro-hydraulique. ■



Le Conseil régional de Rhône-Alpes investit 10 millions d'euros dans les économies d'énergie et la production de renouvelables. Sur le toit de son bâtiment, des capteurs solaires.

BIOGAZ : PASSER DE 400 À 1 500 USINES



© JEAN-MARIE RAMÈS

Production d'électricité de 17 MW à partir de biogaz dégagé par des déchets non recyclables à Plessis-Gassot (Val-d'Oise) conçue par Veolia avec Dalkia et Clarke Energy.

Quatre exploitations agricoles de Mortagne-sur-Sèvre (Vendée) produisent chaque jour l'équivalent de 85 tonnes de gaz de 13 kg à partir de déchets d'élevage et ceux d'une boulangerie industrielle.

En avril, ce méthane a été injecté dans le réseau GRDF. « La restriction sur les périodes autorisées d'épandage du lisier nous a motivés pour l'exploiter autrement, » explique Olivier Bouchonneau, un des éleveurs invité au 4e colloque national sur la biomasse, début juillet à Paris⁽¹⁾.

En France, la quantité de méthane produite par le secteur agricole va augmenter. « Le gisement de déchets utilisables à 2030-2050 est de 130 millions de tonnes dont 85% d'origine agricole hors cultures, et 15% de déchets d'entreprises ou domestiques, » précise Marc Cheverry, chef du service mobilisation et gestion des déchets de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

→ Investissement de 1,5 milliard d'euros

Aujourd'hui, sur 390 usines de biogaz déjà en service, 140 le sont dans des fermes, 80 sur des décharges et 60 sur des stations d'épuration⁽²⁾. La ministre de l'Écologie a annoncé des appels d'offres pour 1500 méthaniseurs sur trois ans, soit un investissement de 1,5 milliard d'euros, selon Bruno Lebourgeois, chef du bureau des technologies de l'énergie au ministère de l'Économie.

« La filière démarre, » reconnaît Sandra Lagumina, directrice générale GRDF. L'Allemagne dispose déjà de 9 200 installations de 7 kW à 54 MW, selon Michael Köttner, directeur d'un centre de compétences sur le biogaz en Allemagne invité à Paris.

Une usine de méthanisation a besoin de producteurs de déchets, d'entreprises d'installation et de suivi, de clients en énergie et en sous-produits (chaleur, compost, digestat), d'une banque, tout cela sur un territoire qui a un rôle à jouer : la collectivité locale peut attirer les projets, contribuer à leur acceptabilité, fédérer les acteurs, prévoir un réseau de chaleur (récupération), financer, et accompagner jusqu'au bout.

→ Carte des points d'injection sur le réseau

L'injection dans le réseau ne peut pas se faire partout. « En été, il n'y a plus assez de consommateurs pour injecter du biogaz dans le réseau, observe Catherine Foulonneau, directrice stratégie et territoires chez GRDF. Il faut trouver le bon endroit pour injecter. Nous préparons une carte du potentiel. »

Autre frein à ces productions : le coût. Methaneo qui l'évalue à 6 000-8 000 euros le kilowatt installé, espère l'abaisser de 5-10%.

La méthanisation peut être subventionnée par les fonds chaleur et déchets. Toutefois, Antoine Jacob, président du

Club Biogaz (ATEE), conseille de chercher l'équilibre sans aide et de mettre dans la balance les revenus en énergie, le traitement de déchets, la fabrication d'engrais non chimiques et la captation de gaz à effet de serre.

Le biogaz est vendu entre 48 et 123 euros le mégawatt-heure à GRDF qui, de son côté, achète du gaz "arrivée frontière" à 25-30 euros. De l'avis de plusieurs intervenants au colloque, les tarifs de rachat calculés sur la taille de l'installation ne sont pas adaptés.

Les coûts de fonctionnement sont sous-estimés. L'usine des éleveurs de Vendée occupe une personne à plein temps.

→ Un comité national en préparation

Le soutien de l'État à cette production renouvelable est inscrit dans le Plan énergie méthanisation autonomie azote (mars 2013). Il dépend des ministères de l'Agriculture et de l'Écologie qui montent un comité national spécifique. ■

⁽¹⁾ Organisée par le Syndicat des énergies renouvelables et France biomasse énergie.

⁽²⁾ Restent 18 installations territoriales, 18 industrielles et 11 sur ordures ménagères. Source : Club Biogaz, ATEE.



© SOCIÉTÉ D'ARCHITECTURE BOITTE

Le fumier du zoo de Beauval (Loir-et-Cher) associé à des déchets verts et agricoles dégagent du méthane qui sert à produire de l'électricité vendue à EDF et de la chaleur pour les gorilles, les lamantins et les éléphants.

HYBRIDATION D'ÉNERGIES

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie lance un appel à manifestation d'intérêt sur les énergies renouvelables avec deux nouveaux axes : l'hybridation d'énergies et le refroidissement renouvelable. L'hybridation comprend le mélange d'énergies traditionnelles et renouvelables, ou celui de plusieurs renouvelables, avec des moyens de stockage. Propositions à remettre pour le 3 mars ou pour le 2 octobre 2015. Détails sur le site de l'Ademe (appels à propositions).

RÉSEAU DE CHALEUR À SACLAY

L'Établissement public Paris Saclay (Essonne) a reçu fin juillet les réponses à sa consultation pour un réseau de chaleur et de froid alimenté pour moitié par de la géothermie (nappe de l'Albien). Tous les sites du campus y seront raccordés y compris ceux déjà construits. L'établissement est chargé du développement du pôle scientifique et technologique (loi Grand Paris).

SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS : MISSION ÉLARGIE

Une ordonnance élargit les missions de la Société du Grand Paris (SGP). Elle peut, dans certaines conditions, participer à des projets d'infrastructures de réseaux de transport public de voyageurs autres que ceux dont elle a la maîtrise d'ouvrage par la loi n°2010-597 de 2010.

La SGP peut ainsi financer tous travaux de métro et RER en correspondance avec les lignes du Grand Paris Express (métro rapide) et être maître d'ouvrage en ce qui concerne le métro si le Syndicat des transports d'Île-de-France la désigne.

UN CADASTRE UNIQUE

Un cadastre regroupant celui de la Direction générale des finances publiques (DGFIP) et celui de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) est en préparation. Après des expérimentations menées avec des collectivités territoriales et l'Ordre des géomètres experts, le projet est entré dans une phase de plus grande ampleur, dans plusieurs départements, d'ici à la fin de l'année, avec la perspective de couvrir l'ensemble du territoire en 2015.

Pour cela, a été signée fin mai une convention de partenariat entre les représentants de la DGFIP et de l'IGN ainsi que du secrétariat général du ministère de l'Écologie et du ministère de l'Égalité des territoires et du Logement.

Ce nouveau cadastre, baptisé RPCU pour représentation parcellaire cadastrale unique, sera ensuite géré et mis à jour par la DGFIP. C'est un document administratif fiscal et foncier.



Vue d'une partie d'un cadastre RPCU après correction de 35 m de la limite d'une commune.

GÉOTHERMIE : LES ENTREPRISES CRÉENT LEUR ASSURANCE



La production d'électricité géothermique de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) dégage aussi 15 MW de chaleur à 30°C.

Geodeep, groupe d'entreprises françaises de géothermie haute énergie, met en place un fonds pour assurer le risque d'échec sur la ressource. En effet, il faut d'abord investir dans une campagne d'études et des forages pour évaluer ce que recèle le sous-sol. Le groupement propose une offre globale depuis la caractérisation de la ressource jusqu'à la livraison de centrales qui fournissent électricité et chaleur, un marché dynamique selon Christian Boissavay, président de l'Association française des professionnels de la géothermie⁽¹⁾.

→ Retour d'expériences

« Le fonds de 100 millions d'euros est indispensable pour passer du stade de la connaissance académique au stade industriel », précise Jean-Jacques Graff, vice-président de Geodeep et directeur général d'ES-Géothermie. « Il va aussi servir à consolider le savoir-faire français grâce au retour d'expériences qu'il induira », indique Jean-Philippe Soulé, directeur de Fonroche Géothermie.

L'EGS ou géothermie assistée (Enhanced Geothermal System), se trouve en métropole tandis que la volcanique correspond à l'activité dans les départements et régions d'outre-mer (Drom), et à l'export. La première va chercher l'eau très chaude dans les failles d'effondrement tandis que la seconde la récupère dans des terrains remontés vers la surface. « La France ne s'intéresse qu'aux effondrements naturels et a renoncé à la fracturation hydraulique en géothermie », informe Jean-Jacques Graff. Les gisements sont suffisants pour couvrir les besoins sans se risquer dans des projets qui posent des problèmes d'accep-

tabilité. Nous devons créer une vitrine en France afin de nous développer à l'export. »

→ Exploiter plus la chaleur

La récupération de chaleur sur géothermie haute énergie se développe. Le pilote EGS de 1,5 MW à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) libère 15 MW de chaleur à 30°C quand il produit de l'électricité. Cette chaleur est pour le moment évacuée par aérotherme.

En Rhône-Alpes, Electerre propose cette chaleur renouvelable aux collectivités locales en plus de l'électricité.

Sur l'île de Sulawesi (Indonésie), de l'eau à 150°C-160°C générée par une petite électrification rurale sur géothermie, pourrait servir à une activité de séchage

industriel selon l'étude de préféabilité de CFG Services.

→ 300 MW en perspective

La France abrite 16,5 MW d'électricité géothermique⁽²⁾. Le fonds de garantie de Geodeep peut contribuer à introduire 300 MW de plus sur cinq ans dont un tiers à l'export. Vingt projets pourront être engagés d'ici à 2020 dont 10 installations de chaleur et électricité EGS, 4 d'électricité dans les Drom et 6 d'électricité dans des régions volcaniques à l'étranger. Ils généreront 2 milliards d'euros de chiffre d'affaires et créeront un millier d'emplois en France. ■

⁽¹⁾ Partenaire de Geodeep avec le Syndicat des énergies renouvelables et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

⁽²⁾ Cf. Travaux janvier-février 2013 page 10 et mars-avril 2012 page 15.



Le forage a commencé à 15 km de chez Roquette, industriel du Bas-Rhin qui utilisera une chaleur géothermique à 160°C.

COUVRIR LE RISQUE GÉOLOGIQUE SUR LE LONG TERME

Le fonds de garantie du risque géologique destiné aux installations géothermiques haute énergie devrait être prêt pour fin 2014 et les premières demandes, examinées au printemps 2015.

Le groupe d'entreprises Geodeep (cf. ci-contre) le met en place avec l'aide de Capgemini Consulting.

Le fonds de 100 millions d'euros sera financé pour moitié par le public - investissements d'avenir, subventions - et par le privé. Le porteur du projet verse une prime d'assurances sur les dix premières années couvrant la période d'exploration, de caractérisation de la ressource géothermique et du début de production. Puis, si la source vaut la peine, il continue de verser une prime mais moindre pendant les quinze années suivantes. Ce paiement de l'assurance au-delà de la période la plus risquée constitue l'originalité de cette garantie.

En cas d'échec - en phase d'exploration ou en début de production - les primes déjà versées sont remboursées.

LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE CHANGE LE REGARD SUR LE GÉNIE CIVIL

Définir la transition écologique, c'est indispensable pour appliquer la notion aux infrastructures. « Avant, nous parlions de développement durable, a indiqué Maud Lelièvre, directrice de l'association Eco maires lors d'une conférence sur ce thème⁽¹⁾. Aujourd'hui, la transition signifie faire muter les territoires pollués, employer les nouvelles technologies dans le bâtiment et les transports, faire face à la baisse des ressources énergétiques et à la perte de biodiversité. » Ce que Georges Tempez, directeur techniques infrastructures de transport et matériaux (DTITM, ex-Sétra), résume en ces mots : « Les problèmes qui étaient accessoires sont devenus centraux. »

Pour Christian Tridon, président du Syndicat des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (Strres), la transition, « c'est moins de clivage entre public et privé. L'impact écologique est plus faible si nous entretenons les ouvrages d'art plutôt que d'avoir à les reconstruire entièrement. »

→ Innover dans le service

La transition écologique est au cœur de la convention d'engagement volontaire signée en 2009 entre l'État, les collectivités locales et les entreprises, et déclinée depuis en régions⁽²⁾. « Les engagements de cette convention vont être appliqués dans d'autres filières comme les industries extractives et de transformation, » informe Loïc Lejay, chargé de mission développement, recyclage et valorisation des déchets au ministère de l'Écologie⁽³⁾.

Autre changement : la nécessité d'une vue globale sur les projets. « Nous mou-



Du point de vue écologique, mieux vaut entretenir un pont que de le laisser se dégrader et d'avoir à le reconstruire. Ici, travaux sur un pont de l'A36 par Eiffage.

© EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

rons du morcellement entre chaussée, transport, bâtiment BBC ou HQE, regrette Florence Castel, directrice du pôle de compétitivité Advancity. Il faut intégrer la mobilité dans la vie de la ville. L'innovation peut aussi être dans le service. Notre pôle travaille sur le raccourcissement des procédures. »

L'éloignement de l'État et la baisse des moyens financiers rebattent les cartes : « Les élus veulent une réponse à leurs besoins et faire des économies, témoigne Maud Lelièvre. Ils recherchent une offre globale et plus d'accompagnement. »

→ Rôle des Dreal

La convention nationale d'engagement volontaire a prévu l'implication sur le terrain des directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal). C'est le cas, par exemple, en Poitou-Charentes.

« L'écologie se traite aussi au niveau du chantier, recommande Marie-Françoise Bazergue, directrice adjointe de la Dreal qui accompagne les projets le plus en amont possible. En cas de décalage dans le temps entre projet et réalisation, notre rôle est de refaire partir le chantier en intégrant les nouveaux éléments réglementaires de façon à ce qu'il n'y ait pas de recours. La biodiversité demande du dialogue entre génie civil et génie écologique sur le terrain, et entre les entreprises. » ■

⁽¹⁾ Conférence Le défi de la transition écologique organisée par l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité, la Fédération nationale des travaux publics et le ministère de l'Écologie, le 11 juin à Paris.

⁽²⁾ Partenaires : ministère de l'Écologie, Assemblée des départements de France, FNTP, Terrassiers de France, Usirf, Syntec-Ingénierie.

⁽³⁾ À la Direction générale de la prévention des risques.

BRETAGNE : CONVENTION UNICEM-EDF

L'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (Unicem) en Bretagne a signé une convention avec EDF pour économiser l'énergie, à la mi-juin. Les entreprises du secteur veulent améliorer leur efficacité énergétique, ce qui contribue à sécuriser l'alimentation électrique de la région et donc, la leur. Le partenariat s'inscrit dans l'engagement développement durable de l'organisation professionnelle avec le Conseil régional en 2012. EDF apporte son expertise en maîtrise de l'électricité.



© UNICEM

Les carrières veulent maîtriser leur consommation d'électricité.

COLLABORATION SCIENTIFIQUE USIRF-CEREMA

L'Union des syndicats de l'industrie routière française (Usirf) et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) ont signé une convention de partenariat à l'issue de l'assemblée générale de l'Usirf, en juin.

Le conseil d'administration du Cerema devait valider à la mi-juillet.

Les deux organismes veulent ainsi s'engager dans une collaboration scientifique, approfondir les connaissances techniques routières et les diffuser, développer des actions techniques et de recherche en faveur de l'innovation et du transfert de technologie, et mettre au point des référentiels.

ÎLE-DE-FRANCE : VOIES RAPIDES POUR LES BUS



© CHRISTOPHE RECOURAVSTIF

Bus express empruntant l'autoroute A14 entre La Défense et Vernouillet (Yvelines).

De 2014 à 2020, 65 millions d'euros vont être dépensés pour aménager des voies dédiées aux bus sur des portions d'autoroutes ou de voies rapides en Ile-de-France. Ceci dans le cadre de la mise en œuvre du Plan de déplacements urbains de la région (PDUIF) avec la Direction des routes d'Ile-de-France (Dirif).

Il s'agit d'améliorer la circulation des bus express, en vitesse et fréquence. Onze axes ont été retenus. Sept tronçons sont prioritaires sur les autoroutes A1, A6, A10, A3, A12, et les routes nationales

118 et 104. Les travaux font l'objet d'un contrat entre l'État, la Région et le Syndicat des transports d'Ile-de-France (Stif).

→ Longueur : de 1 à 10 km

Les aménagements, de 1 à 10 km, consistent en l'ouverture de la bande d'arrêt d'urgence ou la réservation d'une voie en période de bouchons. Des zones d'intermodalité seront créées afin d'assurer les correspondances entre bus, ou avec le train, le RER, le métro, le tramway et avec les voitures. Sur l'A1 et l'A6, en direction des aéroports, les taxis pourront emprunter ces voies réservées. ■

DALKIA COUPÉE EN DEUX

EDF et Veolia Environnement ont finalisé la reprise de Dalkia. EDF reprend les activités du spécialiste des services énergétiques en France, et Veolia Environnement, celles à l'international. Pour le moment, la marque Dalkia qui appartient à EDF cohabite dans les deux entités. Dalkia était une filiale commune aux deux groupes avec Veolia, 66% des parts, et EDF, 34%. En 2013, Dalkia déclare un chiffre d'affaires "géré" de 8,38 milliards d'euros dont 3,52 en France.

REPRISE DE BOSCH SOLAIRE

Le groupe Sofie, holding de Sillia Energie, société française fabricante de panneaux photovoltaïques à Lannion (Côtes-d'Armor), a repris l'activité de Bosch Solaire située à Vénissieux (Rhône) à l'arrêt depuis plusieurs mois. Les deux entités ont été réunies le 16 juin dans Sillia VL qui, à travers les deux usines, aura une capacité de production d'un million de panneaux par an, soit l'équivalent de 260 MW. À noter qu'Urbasolar, fabricant dans le Sud, est entrée au capital de Sillia VL.



Fabrication de panneaux photovoltaïques chez Sillia Energie.

UN DRONE DÉTECTE DES PANNES



Le drone a survolé les 4 ha de la centrale solaire de Sourduin (Seine-et-Marne).

Un drone peut servir à détecter des pannes sur des cellules photovoltaïques. Ce petit engin volant téléguidé a survolé les 4 hectares de la centrale solaire de Sourduin (Seine-et-Marne) et a relevé les températures anormales grâce à ses caméras thermiques.

Selon La générale du solaire, fabricant des 18 700 panneaux photovoltaïques du site, c'est un moyen rapide d'identifier les défauts sur les capteurs et avec précision. Nul n'est besoin de couper le courant ni d'arrêter l'exploitation pendant cette opération. Il est même possible de programmer des vols automatiques. La centrale de Sourduin, d'une puissance de 4,5 MW, peut fournir 4 800 kWh par an. Elle est exploitée par Bouygues Energies et Services qui a expérimenté ce drone pour la première fois en juin.

→ Traqueur de soleil

Toujours dans le photovoltaïque, la filiale de Bouygues Construction est mandataire du projet de conception, construction, maintenance et exploitation pendant dix ans de trois centrales au sol dans les Landes. Exosun fournit les trackers

solaires, structures qui permettent aux panneaux de suivre la course du soleil, et Schneider Electric, les composants électriques. Le chantier de six mois s'est terminé cet été. Le contrat des trois centrales, d'une puissance totale de 25 MW, s'élève à 20 millions d'euros. ■

80 IMMEUBLES MOINS GOURMANDS

Gecina fait appel à Bouygues Energies et Services pour améliorer la performance énergétique de 80 immeubles de bureaux. L'exploitant a proposé son Hypervision, solution de comptage, relevés à distance, et logiciels. L'outil collecte les consommations à distance et accompagne la société foncière dans les économies d'énergie et la sensibilisation des occupants. Il en coûte un forfait annuel qui, selon Bouygues, est remboursé par la réduction des charges.

PRÈS DE 1 000 LOGEMENTS ÉCONOMES EN ÉNERGIE



Immeuble Le Solana dans l'écoquartier du Font-Pré à Toulon (Var).

Deux filiales du groupe Elithis viennent de remporter les marchés de conception thermique de bâtiments dans deux écoquartiers. Le premier situé à Font-Pré à Toulon (Var), est construit à l'emplacement de l'ancien hôpital de la ville. Il abritera logements, bureaux, commerces, jardins, crèche, mairie et pôle médical. Bénéficiaire et Elithis Ingénierie ont une double mission sur 762 logements : faire qu'ils consomment moins que ne l'exige

la réglementation thermique 2012 et suivre les lots concernés par la thermique. Le site n'est alimenté qu'en électricité. Des pompes à chaleur de grosse puissance, placées en toiture, assureront le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire.

L'aménagement de l'écoquartier de Toulon est confié à Bouygues Immobilier avec cinq cabinets d'architectes : 331 Corniche, Artek, Garcia Didier, Guy Malot et Violla Pouliquen.

→ Bâtiments passifs ou mieux

Par ailleurs, Kaufman & Broad a également choisi les filiales d'Elithis pour la conception thermique de 172 logements de l'écoquartier Clichy-Batignolles (XVII^e arrondissement) dessiné par AAVP Architecture Vincent Parreira et Aires Mateus. La Ville vise le niveau bâtiment passif voire à énergie positive, soit 20% de

consommation d'énergie primaire en moins que ne l'exige la réglementation thermique de 2012. Les bâtiments seront isolés, orientés et dotés d'une ventilation à récupération de calories sur l'air extrait, de façon à limiter les besoins en chauffage, ici à air. ■



Vue du futur écoquartier Clichy-Batignolles à Paris.

MESURER LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE RÉELLE



Construction d'un HLM à Maimat (Haute-Garonne) avec un mur double isolant, en 2013.

La mesure des performances énergétiques d'un bâtiment, celui-ci une fois occupé, est perçue comme accélérateur de l'innovation dans la construction neuve. En rénovation, elle servirait à évaluer l'état de l'immeuble avant travaux et à déterminer le progrès après. Pour le moment, il n'y a aucune norme sur la méthode.

Les calculs thermiques des projets prévoient des consommations théoriques à partir de plans. La réalité diffère. La qualité de construction peut laisser à désirer. Les occupants influent sur les consommations en particulier s'ils ne respectent pas les conseils de comportement (fermer la fenêtre d'un local climatisé, éteindre les lumières, les équipements, etc.).

Les professionnels dont ceux de la Fédération des services énergie environnement, soutiennent la création d'une méthode de mesure dite *in situ*. Ils ont participé à l'audition publique organisée par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, fin mai. L'OPECST, créé en 1983, informe le Parlement des conséquences des choix à caractère scientifique et technologique afin d'éclairer les décisions.

→ Étude parlementaire

L'audition du 22 mai fait partie de l'étude sur les freins réglementaires à l'innovation en matière d'économies d'énergie dans le bâtiment menée par Marcel Deneux, sénateur, et Jean-Yves Le Déaut, député, présidents de l'office. ■

Source : Le Monde du 26 mai. Vidéo du 22 mai sur www.senat.fr/opesct/.

RELEVÉS AU CHÂTEAU DE VERSAILLES

Sintegra vient de terminer le relevé architectural de la façade du Grand Trianon au Château de Versailles (Yvelines) et de la charpente de la Chapelle royale. Reste à en analyser les données. Disposer des plans de la façade en 2D et de l'état des poutres de la chapelle en 3D est indispensable à leur restauration. Les corniches du Grand Trianon sont très dégradées. Les orthophotoplans obtenus par redressement de photos haute résolution ont permis d'éliminer les déformations. Quant à la charpente, elle date du XVIII^e siècle.

Le géomètre expert a scanné toutes les poutres. Ainsi les architectes des monuments historiques de l'Établissement public de Versailles découvriront-ils leur forme réelle, comprendront-ils leur structure et pourront-ils les rénover.

L'entreprise, installée en Isère, fête ses 60 ans.



Les géomètres scannent les poutres de la Chapelle royale à Versailles.

LA QUALITÉ AU SECOURS DE LA DÉFENSE



Tour Carpe Diem livrée en 2013. À droite, la Tour Europe de 1969.

Désormais, tous les projets de tours, bureaux et logements de La Défense (Hauts-de-Seine) devront atteindre un minimum de performances énergétiques et environnementales. Cette volonté de l'Établissement public d'aménagement de la Défense Seine Arche (Epadesa) a débuté par la signature d'une convention avec deux organismes - Certivea et Cerqual - qui délivrent les certifications Haute qualité environnementale et Habitat & environnement. Selon l'Epadesa, 3 600 logements y seront réalisés d'ici 2019.

Jusqu'à présent, l'exigence s'appliquait à une partie du quartier, le secteur Seine Arche, avec la certification Habitat &

environnement de Cerqual. Désormais, est concerné l'ensemble du territoire situé sur Courbevoie, La Garenne-Colombes, Nanterre et Puteaux.

→ Sauver l'existant

De plus, l'Epadesa se préoccupe de la qualité des immeubles existants dans le quartier d'affaires, notamment parce qu'ils doivent rester attractifs à la clientèle. Il a demandé à Goodwill Management de mettre en œuvre un observatoire de leur performance énergétique et environnementale, au second semestre 2014. Les données récoltées serviront de base à une discussion avec les propriétaires d'actifs immobiliers en perte de vitesse. ■

PONT PLUS HAUT CONTRE LES CRUES

La commune de Revin (Ardennes) reconstruit le pont qui franchit la Meuse et la relie à Saint-Nicolas. L'ancien ouvrage d'art, à tablier et appuis métalliques du type Arromanches, était à voie unique. Il est remplacé par un pont plus haut de façon à laisser passer les eaux de la Meuse lors des crues. Il comporte un tablier métallique de 128 m sur 15,5 m de large posé sur une pile béton sur rive droite à 35 m de la culée.

La commune a délégué la maîtrise d'ouvrage au Conseil général des Ardennes qui met à disposition un ingénieur et un technicien pendant deux ans.

L'opération est estimée à 9,5 millions d'euros TTC dont 2,65 payés par le département.

Les travaux ont commencé en avril 2013 et se termineront fin 2014. Le nouveau pont ouvre en octobre. L'ancien pont a été démonté en juin. ■



Image du nouveau pont métallique au-dessus de la Meuse.

INTERFACE CONSOMMATIONS

Hager, spécialiste du bâtiment intelligent, propose une interface de visualisation et de pilotage d'un immeuble collectif. Il permet de contrôler les consommations énergétiques des différents occupants, avec un accès sécurisé.

Grâce à cela, l'exploitant peut les conseiller en maîtrise de l'énergie. Le système autorise le relevé à distance et le pilotage des équipements techniques. De leur côté, les habitants voient leurs consommations et peuvent adapter leur comportement.

Les produits du fabricant utilisent un protocole ouvert de communication, le KNX, compatible avec de nombreux systèmes.



Visualisation des consommations d'énergie d'un bâtiment connecté.

BÂTIMENT : BONNES PRATIQUES MODÉLISATION

Le Plan urbanisme construction architecture* (Puca) a lancé une consultation pour expérimenter et référencer les bonnes pratiques de construction, requalification, entretien, maintenance et exploitation de bâtiments, qui utilisent la maquette numérique Bim (Building Information Modeling). Cet appel entre dans le cadre de la Plate-forme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment (Prebat).

Le Puca veut se servir de ce système pour améliorer le rapport coûts-bénéfices sur la durée de vie d'une construction. Dépôt des dossiers avant le 27 octobre.

* Structure émanant du ministère de l'Écologie et de celui de l'Égalité des territoires et du Logement.
www.tp.urbanisme.equipement.gouv.fr/puca

ÉCLAIRER À DISTANCE AVEC LA LUMIÈRE DU JOUR



Éclairage d'un souterrain de la centrale électrique de Cheongpyeong (Corée du Sud) par la lumière du jour concentrée.

Utiliser l'éclairage naturel, c'est bien, le démultiplier, c'est encore mieux et encore plus économe en électricité. La Compagnie du ciel distribue en France des systèmes coréens capables de diffuser la lumière dans des souterrains, tunnels, mines, etc.

La centrale électrique de Cheongpyeong (Corée du Sud) éclaire un volume souterrain de 2 193 m³ sur 150 m à 100 lux (photo) grâce au Sunportal CS. Le procédé comprend un héliostat à capteur parabolique qui concentre le rayonnement solaire. Puis, il achemine ce rayonnement sur 200 m maximum à travers une série de lentilles optiques jusqu'à 20 cm de diamètre. Il est basé sur une technologie de traitement anti infrarouges qui supprime les pertes ou gains de chaleur.

Autre exemple : à l'aciérie Posco à Pohang. Un volume de 624 m³ aveugle reçoit la lumière du jour sur 130 m à 130 lux. Toujours en Corée du Sud, le passage souterrain d'Onchunchun reçoit ainsi 80 lux sur 150 m (volume 8 640 m³). Des leds prennent le relais la nuit.

→ Conduit de lumière

Le Sunportal CS n'est pas encore installé en France. Un autre produit exploitant la lumière du jour l'est déjà, dans les Hauts-

de-Seine et en Haute-Loire. Le Deplosun, conduit de lumière dont le haut aplati (hublot), s'intègre dans un sol ou une terrasse. Il mesure jusqu'à 95 cm de diamètre et 20 m de long, sur demande. Il comporte une grille d'acier dont les facettes et l'inclinaison optimisent la diffusion du rayonnement. ■



"Descente" de la lumière du jour par une série de lentilles optiques.

ASCENSEUR À ÉNERGIE SOLAIRE



L'ascenseur est testé à Barcelone (Espagne).

Schindler teste un ascenseur à énergie solaire à Barcelone (Espagne). Cette expérimentation vise à couvrir l'intégralité des besoins en électricité de ces équipements par des capteurs photovoltaïques posés sur le toit et accompagnés d'un stockage d'énergie. Pour le moment, le prototype assure un peu moins de la moitié des besoins en électricité.

Le Schindler 3300 qui doit encore être amélioré, se branche sur courant monophasé⁽¹⁾. Il peut être relié à une surface solaire de 2 à 8 m². Un outil de gestion des flux d'énergie permet le couplage de

l'ascenseur avec du captage d'énergie solaire. Le premier fonctionne quand il est sollicité avec des pics de puissance tandis que le second fournit quelques watts sans discontinuer.

→ Énergie de secours

La technologie trouvera ses débouchés dans les pays à fort ensoleillement et faible réseau électrique, ou ailleurs, comme solution de secours en cas de coupure de courant. ■

⁽¹⁾ Source : Schindler France et *Les cahiers techniques du bâtiment* 24 juin sur www.lemoniteur.fr.

CAMION À CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES

Dron Location propose un camion fournisseur d'électricité à partir de plusieurs énergies dont du photovoltaïque. L'engin arbore plusieurs lignes de capteurs solaires sur son toit. L'unité de production Hybrid Power Station a été développée par la société Gelec. Cette station mobile peut enclencher plusieurs énergies. Quand il n'y a pas de réseau électrique ou qu'il n'est pas fiable,



Véhicule à production hybride d'électricité.

ou par manque de carburant, l'unité s'adapte et bascule sur la source disponible.

Priorité est toujours donnée à l'énergie renouvelable. Les différentes sources peuvent se combiner ou fonctionner séparément.

Hors utilisation, l'électricité produite sur le véhicule est stockée dans des batteries à haute performance. ■

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 1 ET 2 OCTOBRE

Colloque France énergie éolienne

Lieu : Paris
www.colloque-national-eolien.fr

• 2 ET 3 OCTOBRE

Colloque Le Pont : le génie civil des transports ferroviaires

Lieu : Toulouse
www.le-pont.com

• 7 OCTOBRE

Colloque national éolien

Lieu : Lille
www.colloque-eolien.fr
ou www.windustry.fr

• 7 AU 9 OCTOBRE

L'usager au cœur des réseaux d'infrastructures durables et innovantes

Lieu : Lyon (Eurexpo)
www.idrrim.com

• 7 AU 9 OCTOBRE

Interoute et ville

Lieu : Lyon (Eurexpo)
www.interoute-ville.com

• 7 AU 10 OCTOBRE

Congrès exposition de l'industrie minière

Lieu : Bordeaux
www.lasim.org

• 12 AU 14 OCTOBRE

Conmod : modélisation du comportement du béton

Lieu : Beijing (Chine)
www.rilem.org

• 13 AU 15 OCTOBRE

Tunnels et espaces souterrains

Lieu : Lyon
www.aftes.asso.fr

• 23 OCTOBRE

13e meeting de l'ingénierie de la construction et de l'industrie

Lieu : Paris-La Défense (Cnit)
http://meet-ingenierie.com

• 24 ET 25 OCTOBRE

Congrès de l'Union nationale des syndicats français d'architectes

Lieu : Saint-Etienne (Loire)
http://congresdesarchis.com

FORMATIONS

• 13 OCTOBRE

Prestations de services sites et sols pollués

Lieu : Paris
www.lne.fr

• 13 AU 17 OCTOBRE

Montage juridique et négociation de contrats à l'international

Lieu : Paris
www.metratech.net

• 14 AU 17 OCTOBRE

Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques

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

• 15 AU 17 OCTOBRE

Concevoir un projet intégrant des techniques alternatives aux réseaux

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

• 20 AU 22 OCTOBRE

Concevoir un programme de reconnaissances géotechniques des sols

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

• 4 NOVEMBRE

Financement de projets énergies renouvelables

Lieu : Paris
www.metrol.fr

• 26 AU 28 NOVEMBRE

Suivre et contrôler les travaux géotechniques

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

• 27 ET 28 NOVEMBRE

Introduction à la géothermie

Lieu : Orléans
www.ademe.fr/formations

• 27 ET 28 NOVEMBRE

La robustesse des structures

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

• 2 AU 4 DÉCEMBRE

Réhabilitation énergétique : règles et pratiques pour optimiser le projet

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

NOMINATIONS

AFGC :

Bruno Godart a été élu président de l'Association française de génie civil à la place de Jean-Marc Tanis.

CCCA-BTP :

Armand Suardi a été élu président du Comité de concertation et de coordination de l'apprentissage du bâtiment et des travaux publics après le décès accidentel de René Chauvet en avril.

CONSTRUCTEURS EUROPÉENS :

En 2015, Patrick Liébus, président de la Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (Capeb), présidera aussi l'European Builders Confederation, à la suite de l'Espagnol José Antonio Calvo Delgado.

HLM :

Christian Baffy succède à Michel Ceyrac à la présidence de la Fédération des entreprises sociales et de l'habitat.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE :

François Scarbonchi remplace Sandrine Attia au poste de chef de cabinet de Ségolène Royal. Hélène Peskine, architecte urbaniste, devient conseillère énergie, climat, écomobilité, bâtiment durable.

NUMÉRIQUE :

Sylvia Pinel, ministre du Logement, a nommé Bertrand Delcambre (président du CSTB), ambassadeur du numérique dans le bâtiment.

RÉFORME DE L'ÉTAT :

Sébastien Podevyn s'occupe des relations avec le Parlement au Secrétariat d'État chargé de la réforme de l'État et de la simplification, rattaché au premier ministre et créé en 2014.

SER :

Christian Cardonnel préside désormais la commission énergies renouvelables et bâtiment du Syndicat des énergies renouvelables.

SÉTRA :

Georges Tempez est, depuis juin, directeur techniques in-

frastructures de transport et matériaux (DTITM, ex-Sétra) du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cere-ma).

SNBPE :

Alain Plantier est élu président du Syndicat national du béton prêt à l'emploi. Il remplace Olivier Apruzzese.

SOLETANCHE BACHY :

Didier Verrouil est nommé directeur général de Soletanche Bachy, filiale de Soletanche Freyssinet (Vinci Construction), à compter du 15 juillet 2014.

TSO :

Jean Bernadet a été nommé président de la filiale ferroviaire de NGE. Il en était le directeur adjoint. Il succède à Antoine Metzger.

UNICEM :

Laurent Delafond préside la charte environnement de l'Union des industries des carrières et matériaux de construction, après François Petry.

UNPG :

Arnaud Colson remplace Nicolas Vuillier à la présidence de l'Union nationale des producteurs de granulats.

URBANISME :

Laurent Girometti remplace Étienne Crépon en tant que directeur de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP) au ministère de l'Écologie.

USIRF :

Jacques Tavernier a été élu président de l'Union des syndicats de l'industrie routière française. Il prend la succession de Jean-Louis Marchand.

VILLES MOYENNES :

Caroline Cayeux, sénatrice-maire de Beauvais (Oise), a été élue présidente de la Fédération des villes moyennes de France, à la suite de Christian Pierret.

VINCI CONSTRUCTION :

Jérôme Stubler est nommé directeur général de Vinci Construction à compter du 1^{er} juillet 2014.

VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE

ITINÉRAIRE D'UN AMOUREUX DES GÉOSCIENCES :
REMI DORVAL, PRÉSIDENT DE CGG.

PROPOS RECUEILLIS PAR MICHEL MORGENTHALER



© CGG

Remi Dorval, votre CV commence bien avec Centrale, mais ne s'égare-t-il pas ensuite avec Sciences-Po et l'ENA et un inévitable passage dans la banque ? Par quel miracle vous retrouve-t-on sur les âpres chemins des travaux publics ? Un brevet de conducteur de travaux n'aurait-il pas constitué un meilleur bagage ?

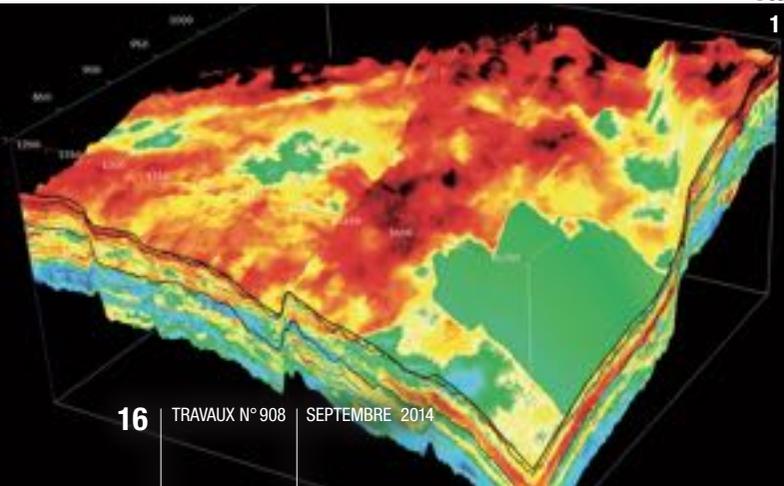
Laissons de côté le début de mon CV, c'est-à-dire le cursus universitaire et les diplômes : à mon âge cela n'a plus beaucoup d'intérêt ! J'ai eu la chance d'avoir des expériences variées, qui m'ont permis non seulement d'acquiescer une certaine compréhension du fonctionnement d'environnements professionnels divers, mais surtout de faire des choses passionnantes et stimulantes. J'ai commencé ma carrière dans l'administration, au Ministère de l'Industrie - déjà le pétrole et le gaz ! - puis au Ministère des Finances avant de faire un bref passage dans le secteur bancaire. Tout cela ne me prédestinait évidemment pas au secteur du « contracting », que ce soit dans le pétrole ou dans les travaux publics. Et pourtant, j'ai rejoint en 1990 le groupe Solétanche pour m'occuper jusqu'en 1997 de forage pétrolier chez Forasol-Foramer, puis de fonda-

tions spéciales au moment de la fusion entre Solétanche et Bachy. Les services pétroliers et les travaux publics présentent bien des analogies dont celle, comme vous le dites, de ne pas offrir des chemins toujours faciles ! Alors bien sûr, le brevet de conducteur de travaux m'a sans doute manqué, mais j'ai essayé de compenser cette carence en écoutant ceux qui savent, en apprenant un peu de leur technique et en apportant parfois, du moins je l'espère, la note de bon sens du candidat !

Solétanche Bachy, où vous avez occupé durant treize ans le poste de vice-président puis de président et directeur général, est une illustre maison aux racines bien-tôt centenaires. Il est reconnu que vous avez beaucoup contribué à sa prospérité, dans des conditions pas toujours faciles. Que vous a-t-elle donné en retour ?

Solétanche Bachy est une très belle entreprise où j'ai passé de très bons moments, bien que parfois un peu difficiles. Elle m'a apporté de grandes satisfactions. C'est à la fois une grande entreprise internationale active sur tous les continents dont l'excellence n'est plus à rappeler et une PME où tout le monde se connaît et où les relations

© CGG



1



© CGG

2

humaines sont essentielles. Elle est dans un défi économique et technique permanent - rien n'est jamais acquis - et confrontée avec les réalités obstinées du terrain au sens propre du terme : la sanction arrive vite si on les ignore ! Et c'est tout autant un métier de chantier, qui requiert une grande capacité d'initiative et de rigueur, qu'un métier d'étude et de conception hautement scientifique et technologique. Tout cela conduit à forger - ou sélectionner - des hommes et des femmes de caractère qui partagent la passion de leur métier et sont prêts à affronter ensemble les difficultés. Cela fait de Soletanche Bachy une entreprise particulièrement attachante. Et c'est tout cela qui m'a plu dans cette entreprise !

Vous accédez aujourd'hui à la présidence de CGG fondée en 1931 par l'un des frères Schlumberger. Elle a fusionné avec Veritas en 2007. Décidément, vous aimez les marques historiques prestigieuses. Décrivez-nous CGG, cette très importante société de consulting et de services qui est à la pointe de ses spécialités.

CGG est aujourd'hui le leader mondial de la sismique et, depuis l'an dernier, un acteur majeur dans les domaines de la géoscience. Société internationale de près de 9 500 personnes (figure 2) avec un chiffre d'affaires en 2013 d'environ 3,8 milliards de dollars, CGG est cotée sur les bourses de Paris et de New York. CGG travaille principalement pour les compagnies pétrolières et gazières. Ces compagnies font appel aux services géophysiques et principalement aux études sismiques à chaque étape du processus d'exploration-production et de gestion des gisements. Les méthodes géophysiques sont basées sur la mesure des ondes sismiques ou électromagnétiques.

Elles ne permettent toutefois pas de révéler directement la structure géologique et doivent donc être inversées.

La sismique est une véritable échographie du sous-sol.

L'acquisition de données sismiques se fait au moyen d'une source d'énergie telle qu'une décharge d'air comprimé en milieu aquatique, une vibration produite à l'aide de camions vibrateurs ou une détonation produite par de petites charges explosives en milieu terrestre, voire toute autre technique libérant de l'énergie qui, émise en surface ou à faible profondeur, crée une onde acoustique qui traverse la terre est réfléchiée par les différentes couches.

L'énergie réfléchiée est captée soit par des sismographes situés à intervalles réguliers de part et d'autre du dispositif de la source d'émission, soit par des hydrophones contenus dans les streamers traînés par un navire sismique, soit par une combinaison d'hydrophones et de géophones contenus dans des câbles fonds de mer (OBC) déposés sur le fond des océans. Les signaux sont amplifiés et convertis en données numériques. Ces données sont intégrées dans un système de traitement informatique qui les transforme en une image.

1- La suite de logiciels de caractérisation de réservoir de CGG aide à comprendre les réservoirs les plus complexes.

2- CGG opère en Alaska depuis plus de 30 ans.

3- Des serveurs de calcul haute performance traitent des volumes colossaux de données sismiques.

4- L'information sismique permet de dériver un modèle de réservoir calibré aux puits.

Les dispositifs complexes d'enregistrement et de traitement des données nécessitent des capacités de mémoire informatique et de calcul extrêmement puissantes (figure 3).

Jusqu'au début des années quatre-vingts, les géophysiciens devaient se contenter d'une représentation bidimensionnelle des couches souterraines en raison de la capacité limitée du matériel d'enregistrement et de traitement.

Le progrès a permis de passer à des modèles tridimensionnels. Au cours des années quatre-vingt-dix, les études sismiques 3D ont en grande partie remplacé les études 2D.

Les images 3D sont particulièrement utiles pour définir les limites des champs de pétrole et en évaluer le potentiel, ainsi que pour sélectionner les meilleurs sites de forage (figure 4). Les études sismiques dans les zones de transition et sur les fonds marins sont réalisées par la dépose de câbles, de nodes ou d'autres instruments de mesure sur le fond de l'océan.

Ces équipements permettent de mener des études sismiques dans des zones non accessibles à des navires, tels que des eaux peu profondes ou les zones entourant les plates-formes de forage. Les câbles de fond océanique peuvent également fournir des données sismiques de grande qualité car ils sont en contact avec le fond marin.

Ces dernières années ont été développées les études à trois composantes et à trois dimensions « 3C-3D » ainsi que les études à quatre dimensions « 4D ».

L'étude en quatre dimensions « 4D » ajoute le temps comme quatrième paramètre. Cette technique consiste à répéter des études similaires 3D sur la même zone à des dates différentes pour observer les changements de conditions géophysiques des couches souterraines. Ce type d'études a pour objet de fournir périodiquement une image des gisements en produc-

tion afin de permettre l'implantation. CGG détient des positions de leader dans les équipements à travers sa filiale Sercel qui détient environ 60% de part de marché, en marine avec la plus grande flotte de navires sismiques de l'industrie (figure 5), dans le traitement-imagerie avec plus de 35% de parts de marché enfin en caractérisation de réservoir et géologie avec des marques de renom telles que Jason ou Robertson.

Oui, CGG a été créée par l'Alsacien Conrad Schlumberger en 1931 et s'appelait à l'époque La Géophysique. CGG s'est développée au fil du temps par croissance organique mais aussi par croissance externe dans les dix dernières années.

Les deux plus importants mouvements stratégiques ont été le rachat, annoncé le 5 septembre 2006, de Veritas, le n°3 mondial, pour créer le n°1 mondial de l'industrie sismique et le rachat des activités géosciences de la société hollandaise Fugro en septembre 2012. Du métier d'origine centré sur l'acquisition à terre de données sismiques, CGG s'est progressivement développée au fil du temps dans le domaine des géosciences, pour en devenir aujourd'hui un acteur majeur.

Les géosciences englobent tout à la fois la géophysique, le métier d'origine de CGG, et la géologie, domaine dans lequel CGG a pris une position importante après le rachat de Fugro l'an dernier.

Les métiers de la géophysique et de la géotechnique en ont fasciné plus d'un et vous-même ne pouvez nier une appétence évidente pour ces domaines. Les hommes qu'on y trouve ont des caractéristiques intrinsèques qui les rendent attachants et fidèles. Pourquoi ?

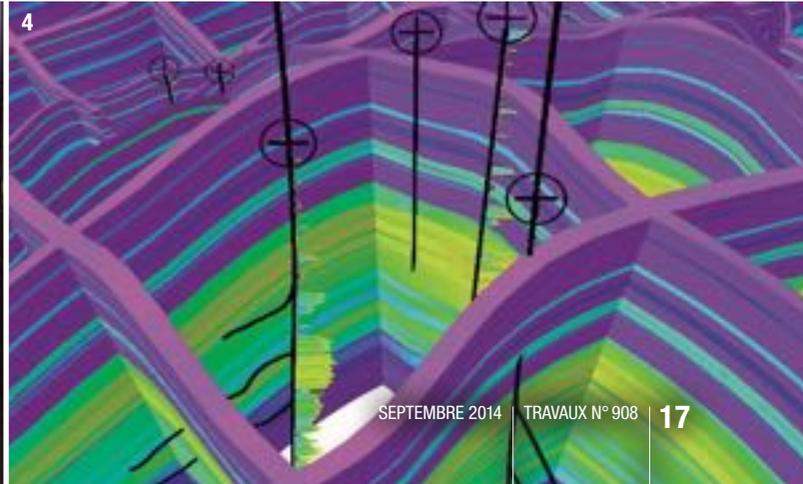
Je retrouve à CGG la même passion pour la société, pour le métier et pour la technologie que celle que j'avais connue à Soletanche Bachy. ▷

© CGG



3

© CGG



4

Ce sont des métiers d'expertises, de techniciens hautement qualifiés pour des enjeux majeurs. Soletanche Bachy exécute des travaux géotechniques qui sont toujours des prototypes et s'applique à proposer à ses clients constructeurs des solutions intégrées apportant une solution complète à un problème donné. De même, CGG apporte aux compagnies pétrolières une image toujours plus précise et plus claire du sous-sol mais également des solutions intégrées qui vont de l'acquisition du signal jusqu'à l'interprétation des images sismiques en corrélation avec les paramètres géologiques.

Peut-on parler d'une excellence française dans ces métiers ? Quel est l'état des forces en présence à l'échelle mondiale ?

Oui, il y a définitivement une excellence française dans le pétrole et les services parapétroliers. Technip, Valourec et CGG sont les leaders mondiaux de leur industrie et des fleurons français dans ce domaine. Mais il y a aussi bien d'autres entreprises, moins connues, qui contribuent à l'excellence française. N'oublions pas que la France, pays sans ressources pétrolières - ou si peu ! -, a réussi à bâtir une puissante industrie pétrolière et parapétrolière. C'est le résultat de la politique d'indépendance énergétique initiée par l'Etat français il y a de très nombreuses années qui a consisté à créer un outil industriel capable d'accéder à la ressource pétrolière et gazière hors des frontières. L'excellence des ingénieurs français a fait le reste et le résultat est que les entreprises françaises tiennent une place importante dans ce secteur. Dans les géosciences, seul Schlumberger possède un profil d'entreprise intégrée similaire à celui de CGG, couvrant l'ensemble de la chaîne depuis la fabrication d'équipements jusqu'à l'enregistrement des données, l'imagerie du sous-sol, l'interprétation et la simulation du réservoir.

La croissance externe a-t-elle une limite, d'une manière générale et dans votre domaine ?

La croissance externe a été un mouvement nécessaire dans l'ensemble du parapétrolier et dans la géophysique en particulier : lorsque le poids des investissements, l'ampleur des risques opérationnels ou les besoins de R&D deviennent trop lourds, les entreprises doivent se regrouper et on assiste à des démarches de croissance externe. C'est ce que l'on a vu, par exemple, dans le secteur du forage pétrolier et à quoi j'ai eu l'occasion de participer. La croissance externe est aussi un bon moyen d'accéder rapidement à une technologie ou bien à un marché. CGG a été active en acquisition externe et le sera encore de manière ciblée sur des technologies clés. Dans le domaine des géosciences, les développements futurs portent sur l'intégration de l'ensemble des métiers pour offrir aux clients pétroliers des solutions répondant à leurs problèmes d'exploration, de développement ou de meilleure production dans des écologies toujours plus complexes. Et ceci ne peut être obtenu par acquisition externe.

L'innovation est une nécessité pour rester en tête de la concurrence. Quelles sont les pistes actuelles ?

CGG a toujours consacré entre 3 et 4% de son chiffre d'affaires à la R&D. Les équipes de R&D sont composées de 950 personnes et sont réparties dans le monde entier. Dans les métiers très technologiques tels que les équipements ou bien l'imagerie et le traitement de données, le budget R&D consacré à la technologie monte jusqu'à 7 à 8% du chiffre d'affaires. La sismique, les géosciences sont aux croisements de nombreuses technologies que ce soit la micro-électronique (mems), la fibre optique, les grandes puissances informatiques, l'algorithmie de calcul ou bien les télécommunications et les transmissions de données. Les pistes actuelles

portent principalement sur l'amélioration continue de l'image du sous-sol, tant dans la définition que dans la résolution, et sur la capacité à acquérir, imager et interpréter ces images d'un sous-sol complexe dans un temps toujours plus court (figure 6).

L'innovation à CGG s'exprime également dans des schémas novateurs aboutissant à des solutions intégrées à haute valeur ajoutée, à la fois pour le groupe et pour ses clients. Cette politique est illustrée par l'accord de coopération technique signé en 2012 avec Baker Hughes, renforcé en 2013 par l'intégration de la sismique de puits dans la joint-venture désormais nommée Magnitude. Son activité est centrée sur les réservoirs de roche mère, gaz et huile de schiste en particulier.

CGG a également accès à de nouvelles technologies grâce à des alliances stratégiques conclues avec des fabricants de matériels, des compagnies pétrolières, des universités ou bien en se portant acquéreur de technologies sous licence. Par ailleurs, CGG continue d'entreprendre des programmes de recherche en commun avec des partenaires, notamment l'IFP Énergies Nouvelles et Ifremer.

Quelle est la part d'activité de CGG liée aux hydrocarbures de roche-mère ? CGG est-elle particulièrement intéressée au gaz de schiste ?

CGG image de la même façon le sous-sol que ce soit pour des hydrocarbures conventionnels ou de roche-mère. Toutefois, dans les roches-mère, l'hydrocarbure reste piégé et l'apport de la sismique porte moins sur la meilleure connaissance des couches géologiques que sur une bonne compréhension des failles pour optimiser les conditions d'exploitation futures de ces hydrocarbures. Aux États-Unis, l'exploration sismique s'est fortement développée dans les pétroles et gaz de schistes au détriment du pétrole et gaz naturels. Toutefois l'activité de CGG dans ce domaine reste faible et essentiellement centrée sur les États-Unis.

Que pensez-vous du gaz de schiste, sur le plan technique et sur le plan politique ?

Je crois qu'il faut aborder le problème du gaz de schiste d'une manière rationnelle. Le monde aura encore pour longtemps besoin d'hydrocarbures. Le gaz de schiste représente une ressource potentielle qui peut dans certains pays être très importante et apporter une contribution significative à la croissance. On aurait donc tort de s'en priver. Pour autant, nous savons que l'exploitation du gaz de schiste peut présenter des risques pour l'environnement et il me paraît normal qu'elle soit encadrée par des contraintes réglementaires : il appartient alors aux entreprises et aux ingénieurs de faire les progrès technologiques nécessaires. C'est d'ailleurs ce qui s'est passé depuis toujours dans l'exploitation pétrolière et gazière. Je suis favorable à l'étude du potentiel économique que pourrait représenter le gaz de schiste en France. Une large étude sismique pourrait d'ores et déjà cadrer le débat économique en permettant d'estimer le potentiel de nos bassins sédimentaires français. □

5- Le navire Oceanic Vega en opération sismique marine dans le golfe du Mexique.

6- Salle de visualisation dans le centre d'imagerie de Houston.

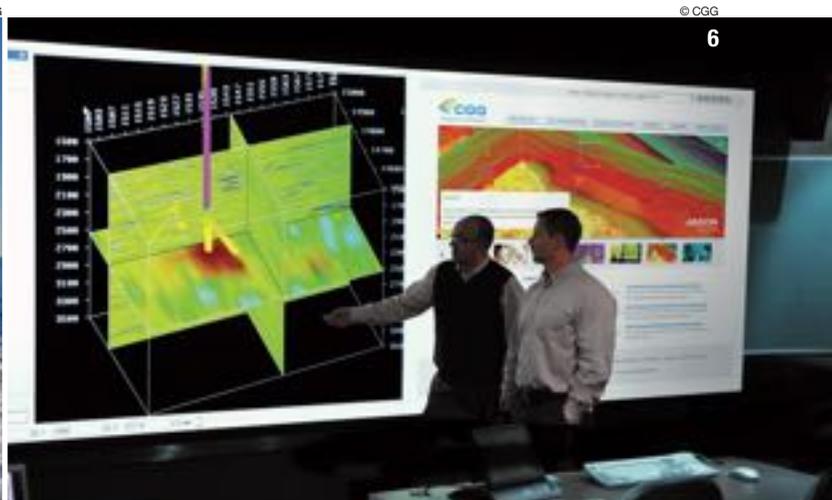
7- Unité de fabrication d'équipement sismique Sercel à Houston.

8- Les images par satellite apportent des informations très utiles à la chaîne Exploration-Production.



© CGG

5



© CGG

6



LES MÉTIERS DE CGG SONT RÉPARTIS EN TROIS DIVISIONS

FABRICATION ET COMMERCIALISATION D'ÉQUIPEMENTS SISMIQUES TERRESTRES ET MARINS

C'est l'activité de la filiale Sercel qui est le leader incontestable de son industrie avec plus de 50% de parts de marché (figure 7). Les systèmes d'enregistrement de Sercel sont basés sur des architectures évolutives et sur une grande diversité de moyens de communication : câbles, radio, micro-ondes, laser, fibre optique. Ils offrent également de très grandes capacités permettant d'enregistrer jusqu'à un million de traces en temps réel. Pour la sismique marine, Sercel fabrique et commercialise des streamers solides et récemment un nouveau streamer solide multi-capteurs, qui combine un hydrophone avec deux composantes d'accélération supplémentaires. À noter également le système Nautilus intégré de contrôle multidirectionnel de positionnement des streamers et des sources sismiques.

ACQUISITION DE DONNÉES SISMIQUES

- Les études sismiques marines de surface sont réalisées au moyen de sources à air comprimé émettant des impulsions acoustiques, d'une part, et d'hydrophones récepteurs à l'intérieur de flûtes sismiques (streamers) pour enregistrer le signal sismique, d'autre part (figure 9). Ces streamers, le long desquels les hydrophones sont disposés en ensembles réguliers à intervalles de 12,5 m, peuvent atteindre une longueur de 12 km. La capacité d'acquisition d'un navire est fonction du nombre de streamers que sa puissance propulsive lui permet de tracter et du nombre de sources acoustiques déployées. L'augmentation du nombre de sources et de streamers permet au navire de réaliser les études avec une efficacité, une définition et une rapidité accrues. Au 31 décembre 2013, la flotte de CGG se composait principalement de 19 navires, dont 15 navires 3D de grande capacité (12 streamers ou plus) et 4 navires 3D de capacité moyenne (8-12 streamers). Tous les navires 3D de CGG sont équipés de streamers solides Sentinel, qui offrent de nombreux avantages par rapport aux streamers liquides (figure 9).
- Les études sismiques terrestres (figure 10) font intervenir des équipes de topographie et des équipes d'enregistrement de données. Les équipes de topographie définissent les lignes qui doivent être enregistrées et marquent sur le terrain le positionnement des sources et celui des équipements d'enregistrement (sauf pour les opérations dites « stackless », pour lesquelles les emplacements des sources ne sont pas marqués mais seulement pro-

grammés par utilisation de points GPS). Les équipes d'enregistrement utilisent des impulsions acoustiques comme sources et des géophones ou hydrophones comme récepteurs des ondes sismiques émises, lesquelles sont enregistrées ensuite dans des systèmes numériques. Les sources acoustiques utilisées sont principalement des vibrateurs en milieu terrestre et des canons à air en milieu marin ou en zone de transition.

Enfin CGG collecte également des données électromagnétiques, magnétiques, radiométriques et gravimétriques grâce à des avions et des hélicoptères (figure 11). La branche possède et opère une flotte de vingt-neuf avions qui ont été modifiés afin d'intégrer des systèmes de mesure géophysique conçus et fabriqués en interne. Les projets nécessitant l'usage d'hélicoptères font intervenir des appareils loués (figure 12).

GÉOLOGIE, GÉOPHYSIQUE ET RÉSERVOIR (GGR)

- Développement et vente de données sismiques que possède le groupe
- Traitement de données sismiques, vente de licences de logiciels de traitement de données sismiques et de caractérisation de réservoir sous les marques Geovation, Hampson Russell et Jason,
- Services de conseil en géosciences et en ingénierie pétrolière,
- Récolte, développement et vente de licences de données géologiques au travers de Robertson,
- Services et logiciels de gestion de données.

Pour le traitement des données, CGG fait appel à des puissances informatiques considérables et réparties dans le monde. La puissance informatique cumulée de CGG représente plus de 36 pétaflops (36×10^{15} opérations avec des nombres flottants par seconde) ce qui fait de cette société l'une des 15 plus grandes puissances informatiques mondiales.

CGG est également un des leaders du conseil géologique à travers sa marque Robertson qui est célèbre en particulier dans le milieu de l'exploration minière et pétrolière pour sa bibliothèque de bases de données et de rapports accessible sur abonnement.

9- Vue aérienne d'un dispositif d'acquisition sismique marine.

10- Opération vibrosismique en Oman.

11- Opération de géophysique aéroportée.

12- Opérations hélicoptères au Pérou.



SOLAR DECATHLON

L'HABITAT SOLAIRE AU PAYS DU ROI SOLEIL

LA FRANCE A ACCUEILLI DU 28 JUIN AU 14 JUILLET DERNIERS, DANS LE PARC DU CHÂTEAU DE VERSAILLES, ET PLUS PRÉCISÉMENT SUR LE SITE DES MORTEMETS, L'ÉDITION 2014 DE SOLAR DECATHLON : UNE COMPÉTITION ARCHITECTURALE INTERNATIONALE UNIQUE EN SON GENRE, QUI PERMET À DES UNIVERSITÉS ET GRANDES ÉCOLES DE CONCEVOIR ET DE CONSTRUIRE UN HABITAT SOLAIRE AUTONOME EN ÉNERGIE.

ENTRETIEN AVEC ALAIN LECOMTE, PRÉSIDENT DU COMITÉ OPÉRATIONNEL DE SOLAR DECATHLON. PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON 1

ALAIN LECOMTE, PRÉSIDENT DU COMITÉ OPÉRATIONNEL DE SOLAR DECATHLON ET PRÉSIDENT DE LA SECTION AMÉNAGEMENT DURABLE DES TERRITOIRES DU CGEDD ⁽¹⁾ RETRACE L'HISTOIRE DE CETTE MANIFESTATION, ENCORE BRÈVE MAIS COMPLÈTEMENT TOURNÉE VERS L'AVENIR, CAR JAMAIS ELLE NE SERA ALLÉE AUSSI LOIN DANS LA DIVERSITÉ DES PROJETS ET LA PRISE EN COMPTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.

La première question qui vient à l'esprit à l'évocation de « Solar Decathlon » est évidemment : pourquoi cet étrange intitulé ?

Il s'agit d'une marque qui appartient au département américain de l'énergie, c'est-à-dire à l'équivalent d'un ministère en France.

« Solar » puisque les projets de maisons et d'habitats en compétition doivent être autonomes grâce à la seule énergie solaire. « Decathlon » car la compétition se joue en 10 épreuves, comme le décathlon d'athlétisme, et non sur une seule épreuve d'efficacité énergétique.



© SOLAR DECATHLON 2



© MARC MONTAGNON 3

Solar Decathlon a été créée au début des années 2000. Au départ, la compétition universitaire était seulement américaine et non pas internationale, mais elle l'est devenue très rapidement. Les Américains l'organisent tous les deux ans. Elle se déroulait jusqu'à une époque récente sur le National Mall situé devant le Capitole à Washington.

1- Alain Lecomte, président du comité opérationnel de Solar Decathlon.

2- Cérémonie d'ouverture avec, de gauche à droite : Catherine Pégard, présidente de l'établissement public du Château de Versailles, Sylvia Pinel, ministre du Logement et de l'Égalité des Territoires, François de Mazières, député-maire de Versailles.

3- Le projet « Rhome for DenCity » du Team Rhome de Rome, Italie.

4- L'équipe Rhome, 1^{er} prix du concours, au grand complet devant son projet.

5- Le projet Philéas de l'équipe Atlantic Challenge, de Nantes, France, second grand prix.

6- Vue d'ensemble de l'exposition.



© SOLAR DECATHLON

6

20 ÉQUIPES DE 16 PAYS

Durant 18 jours, 600 compétiteurs, 200 professeurs, 41 universités et 16 pays* constituant les 20 équipes en lice ont soumis 20 prototypes grandeur nature aux tests de 10 épreuves rigoureuses. Au terme de 18 mois de conception et de construction, chaque équipe a été évaluée par 6 jurys internationaux de renom.

* France, Allemagne, Italie, Espagne, Suisse, Pays-Bas, Danemark, Roumanie, États-Unis, Mexique, Costa-Rica, Chili, Inde, Thaïlande, Taiwan, Japon.

« RHOME FOR DENCITY », 1^{er} PRIX DU CONCOURS

L'équipe italienne Rhome obtient le 1^{er} prix avec le prototype « Rhome For DenCity ».

Ce projet, à la fois innovant et à la pointe du design, est ancré dans la réalité de la périphérie de Rome. Il s'inscrit dans le voisinage de la Tor Fiscale, une tour de 30 mètres de haut construite au Moyen Âge dans le sud-est de Rome, près des vestiges d'aqueducs antiques.

Rhyme (A Home for Rome) entend s'insérer dans un programme de la ville prévoyant de régénérer le quartier, en remplaçant les habitats illégaux par des logements performants et écologiques tout en préservant le patrimoine historique qui les entoure.

Le second grand prix a été décerné aux nantais d'Atlantic Challenge avec le projet « Philéas ».

En 3^e place sont arrivés les hollandais de Delft et le prototype « A Home With A Skin ».

En 2013, elle a été transférée sur la côte Ouest, à Irvine en Californie, sur une base aérienne désaffectée.

Comment la compétition Solar Decathlon est-elle arrivée en Europe ?

L'Espagne, présente dès 2005 à Washington, a importé cette compétition en Europe et l'a organisée à deux reprises à Madrid, en 2010 et 2012. C'est maintenant au tour de la France, dont la candidature a été acceptée par les États-Unis début 2012. Un protocole d'accord a été signé en mars 2012 avec l'ambassadeur des États-Unis à Paris, afin de prendre le relais pour accueillir cette compétition en 2014. La deuxième édition européenne s'est déroulée à Madrid en septembre 2012 et, sur 18 équipes en lice, c'est une équipe française qui a remporté la première place du concours : le projet Canopea du collectif rhônalpin piloté par Pascal Rollet, architecte, et Vincent Jacques Le Seigneur, secrétaire général de l'Institut National de l'Énergie Solaire. Pour la première fois, leur projet était basé non pas sur une maison individuelle mais sur une « nanotour », en liaison avec le site contraint qui est celui de la ville de Grenoble⁽²⁾.

Canopea représentait une tour d'appartements individuels sur plusieurs étages coiffés par un espace collectif ouvert aux occupants des différents appartements. L'équipe a présenté et construit à Madrid le dernier appartement plus l'espace commun.

Le 15 octobre 2012, Cécile Duflot, Aurélie Filipetti, Delphine Batho et Geneviève Fioraso⁽³⁾ ont félicité toutes les équipes et lancé officiellement l'appel aux candidatures aux universités du monde entier pour participer au Solar Decathlon 2014 en France. ▶

© SOLAR DECATHLON

4



© MARC MONTAGNON

5



Comment la France a-t-elle repris à son compte cette compétition à l'origine nord-américaine ?

L'appel à candidature lancé par la France a donné lieu à une quarantaine de réponses.

Après avis d'un conseil scientifique présidé par Alain Maugard, ancien président du CSTB⁽⁴⁾, le comité de sélection a retenu 20 équipes issues de 16 pays et de trois continents différents, plus 7 de réserve pour pallier toute défaillance éventuelle. Dans la réalité, les 20 équipes sélectionnées ont participé au concours.

Dans le comité de sélection qui a choisi les équipes participant à l'édition 2014 figuraient les deux responsables de l'équipe rhônalpine - Pascal Rollet et Vincent Jacques Le Seigneur - ainsi que ceux de l'équipe de Bordeaux - deux enseignants-chercheurs - qui avaient participé aux éditions 2010 et 2012 de Solar Decathlon à Madrid. Pour nous, il était très important d'avoir dans ce comité les représentants des équipes françaises en raison de leur expérience de la compétition.

Quels sont les critères de sélection des équipes ?

En même temps que nous avons lancé l'appel à candidature, nous avons adapté le règlement américain aux exigences du développement durable que promeut la France.

Tout en s'inscrivant dans la continuité des précédents, le règlement français de l'édition 2014 a mis en exergue six dimensions essentielles : la densité (le logement collectif est privilégié afin de minimiser les impacts environnementaux), la mobilité (conception du logement pour prendre en compte la mobilité), l'innovation (mode construc-

tif, approvisionnement énergétique, ameublement, appareils domestiques), la sobriété énergétique (s'il est important d'assurer l'approvisionnement en énergie par des sources renouvelables, il faut au préalable limiter la demande et donc la consommation d'énergie finale), l'accessibilité financière (éviter une augmentation non maîtrisée de l'investissement dans des équipements sophistiqués et coûteux) et la viabilité du logement aussi bien dans le contexte climatique du pays de l'équipe compétitive que de celui du lieu de l'épreuve (chaque équipe devait

trouver une solution d'habitat à énergie positive qui corresponde au contexte et aux spécificités de son pays d'origine). Parmi les critères retenus pour la sélection, figurait également le caractère opérationnel des équipes et, notamment, la faisabilité financière des projets ainsi que, dans une moindre mesure, leur faisabilité technique. L'objectif n'est pas tant de proposer seulement un habitat à énergie positive que l'habitat écologique de demain, qui peut prendre plusieurs formes et non pas uniquement celle de la maison individuelle.

LES PROJETS EN COMPÉTITION

- Philéas** (Nantes, France)
- Ressò** (Barcelone, Espagne)
- EFdeN** (Bucarest, Roumanie)
- Renaihouse** (Chiba, Japon)
- Home with a Skin** (Delft, Pays-Bas)
- Embrace** (Copenhague, Danemark)
- Casa Fenix** (Valparaiso / La Rochelle, Chili / France)
- Techstyle Haus** (Rhode Island / Erfurt, États-Unis / Allemagne)
- Baan Chaan Adaptive House** (Bangkok, Thaïlande)
- Your+** (Lucerne, Suisse)
- Casa** (Mexico City, Mexique)
- OnTop** (Francfort, Allemagne)
- Live-Lib'** (Paris, France)
- Simbcity** (Alcala et La Mancha, Espagne)
- Maison Reciprocity** (Boone / Angers, États-Unis / France)
- Rooftop** (Berlin, Allemagne)
- Rhome for DenCity** (Rome, Italie)
- Maison H°** (Mumbai, Inde)
- Trópika** (Cartago, Costa Rica)
- Orchid House** (Hsinchu, Taïwan)

Comment la diversité des projets s'est-elle manifestée ?

La prise en compte des six dimensions essentielles que j'évoquais précédemment a permis d'aboutir, pour la première fois depuis la création de la compétition, à une très grande diversité de projets.

Certains d'entre eux sont liés à la rénovation (équipe de Nantes), à l'agrandissement par surélévation, avec redistribution de l'énergie produite par la partie surélevée pour l'ensemble de l'immeuble existant (équipe berlinoise), à la transformation de « maisons en bandes », typiques du paysage hollandais, en habitat écologique (équipe hollandaise), à la rénovation urbaine écologique et économique (équipe mexicaine), à la densification écologique dans des immeubles collectifs (équipe indienne)...

D'autres apportent des solutions à des questions propres à la climatologie des pays : comment vivre avec une autonomie en énergie et en eau après une inondation (équipe thaïlandaise), comment construire rapidement après un tremblement de terre des refuges agrandissables (équipe chilienne), comment réaliser une extension horizontale écologique d'immeubles de l'ère communiste (équipe roumaine), comment assurer la convivialité de constructions écologiques (équipe suisse), comment construire de façon écologique et financièrement accessible pour les retraités costaricains (équipe du Costa Rica)... Il est important de noter qu'il ne s'agit pas d'une obsession du soleil mais de concevoir des bâtiments autonomes en énergie. D'ailleurs, les dix épreuves ne concernent pas toutes l'énergie : elles font également référence à l'architecture, l'ingénierie et la construction, l'isolation, le confort...

© MARC MONTAGNON

7



© MARC MONTAGNON

8



Autre caractéristique marquante du Solar Decathlon 2014 : jamais on n'a vu une aussi grande diversité internationale avec des représentants d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud, d'Asie et d'Europe. Il n'y a pas eu maheureusement de candidature africaine. La Turquie et les Emirats-Arabes-Unis font partie des équipes de réserve. Quatre équipes françaises ont participé à l'édition 2014, de façon autonome (Paris et Nantes), soit en faisant équipe avec d'autres universités étrangères (Angers avec une université américaine, La Rochelle avec une université chilienne).

Comment la manifestation a-t-elle été organisée dans le temps et comment s'est-elle déroulée à Versailles ?

Dans la conception de leur projet, dès l'avis du conseil scientifique, les équipes ont été suivies en permanence par l'organisation de Solar Decathlon,

en l'occurrence le directeur de la compétition qui est Pascal Rollet. Deux ateliers les ont réunis à deux reprises au printemps et à l'automne 2013, au cours desquels le comité a vérifié le niveau d'avancement et de faisabilité matérielle des projets.

Les projets ont été montés sur le site de Versailles par les équipes elles-mêmes, à partir de la mi-juin pour une ouverture au public du 28 juin au 14 juillet, avec une désignation des lauréats le 12 juillet. Ces 20 « maisons » ont ainsi été exposées pendant une quinzaine de jours et l'exposition a été ouverte gratuitement au public qui a pu les visiter et se documenter sur leur fonctionnement. Il s'agit de vrais logements et pas seulement de maquettes : on peut y travailler, y dormir et même y faire la cuisine. Seul l'assainissement n'est pas assuré, car ce sont des habitations éphémères. Ces « maisons », pour prendre une image, sont un peu ce que la haute couture est au prêt

à porter : elles sont des prototypes dont la plupart pourraient être commercialisés, ce qui fut d'ailleurs le cas de celle présentée par l'équipe roumaine à Madrid en 2012.

Durant les quinze jours de la compétition, les prototypes ont été mesurés et examinés en continu et chaque équipe a été jugée par 6 jurys internationaux composés des meilleurs experts dans chacun des domaines.

Quelques exemples : pour l'architecture, le jury était présidé par Wang Shu, lauréat du grand prix d'architecture Pritzker en 2012, pour l'urbanisme/transport et l'accessibilité économique, la présidente était Paola Vigano, grand prix de l'Urbanisme 2013.

La diversité des habitats présentés a rendu la tâche plus difficile pour les jurys qui ont dû déceler dans le projet de chacun celui qui avait atteint le mieux ces objectifs dans l'un ou l'autre des domaines concernés.

C'est l'équipe italienne qui a remporté le 1^{er} prix avec son prototype « Rhome For DenCity ».

Pourquoi Versailles ?

À l'époque où nous avons posé la candidature de la France, François de Mazières, maire de Versailles, était président de la Cité de l'Architecture et donc totalement impliqué par la portée de l'événement. Il a proposé le site des Mortemets, dans le parc du château de Versailles, en cours de requalification à l'occasion du 400^e anniversaire de la naissance du jardinier André Lenôtre. Ce lieu prestigieux était parfaitement adapté à notre « chantier ». L'ensemble du site d'accueil est devenu un village durable et éphémère : la « Cité du Soleil ». Il sera rendu dans son état initial à l'issue de la manifestation.

Sur ce site, outre les maisons et habi-

tats exposé par les équipes concurrentes et les équipes de réserve, des espaces collectifs pour le public et pour les partenaires ont pu être aménagés, notamment une Agora de 600 personnes. Des animations et des événements ont ainsi été organisés par les pays d'origine des équipes, par des entreprises françaises, par les grands sponsors tels que Schneider Electric, Total, Bouygues Construction...

Quels étaient les enjeux de Solar Decathlon 2014 pour la France ?

L'accueil de cette compétition a constitué une occasion exceptionnelle de valoriser l'action de la France en faveur de la transition écologique, dans la perspective de la conférence Climat 2015.

Pour la France, Solar Decathlon a permis de montrer au grand public l'habitat écologique de demain et de lui faire comprendre concrètement ce qu'est la transition écologique. La manifestation a mis en évidence les conceptions, les technologies et le savoir-faire dans lequel la France a une carte d'excellence à jouer. Il a également permis aux professionnels de mettre en valeur l'ensemble de la filière du bâtiment dans toutes ses dimensions et de montrer sa capacité de répondre aux exigences du développement durable. □

1- CGEDD : Conseil Général de l'Environnement et du Développement durable.

2- Deux autres équipes françaises participaient également au concours, avec les projets Symbiosi de l'équipe de Bordeaux et Astonysine de l'équipe franco-italienne avec l'école d'architecture de Paris-Malaquais.

3- Solar Decathlon est un projet gouvernemental collectif engagé en 2012 par les quatre ministères de l'Égalité des territoires et du Logement, de la Culture, de l'Enseignement et de la Recherche, de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

4- CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

DIX ÉPREUVES À RELEVER

- 1- Architecture
- 2- Ingénierie et construction
- 3- Installations solaires
- 4- Bilan d'énergie électrique
- 5- Confort
- 6- Équipement et fonctionnement
- 7- Communication et sensibilisation sociale
- 8- Industrialisation et viabilité du marché
- 9- Innovation
- 10- Durabilité

7- Troisième prix pour le projet « Home with a Skin », de l'équipe « Prêt à Loger » de Delft, Pays-Bas.

8- Team Paris, projet Liv-Lib', Paris, France.

9- Équipe Inside Out, projet Techstyle Haus, Rhode Island / Erfurt, États-Unis / Allemagne.

10- Plateau Team, projet Symbcity, Alcala / La Mancha, Espagne.

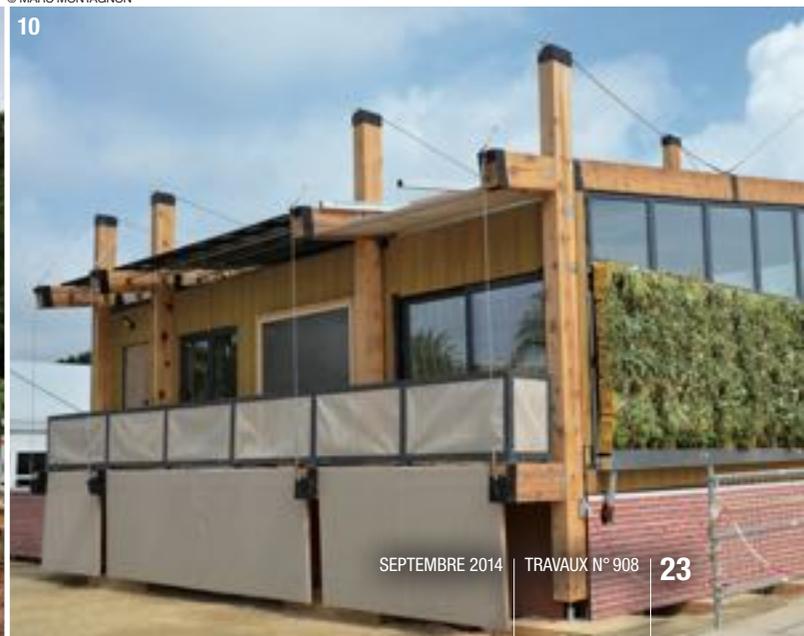
© MARC MONTAGNON

9



© MARC MONTAGNON

10





DCNS

1 © DCNS

LA MER EST L'AVENIR DE L'HOMME

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

ACTEUR MAJEUR DE LA FILIÈRE NAVALE EN FRANCE, DCNS EST CONVAINCU QUE LA MER EST L'AVENIR DE LA PLANÈTE. LE GROUPE INVENTE DONC DES SOLUTIONS DE HAUTE TECHNOLOGIE POUR LA SÉCURISER ET LA VALORISER DURABLEMENT. À CÔTÉ DE LA CONCEPTION ET DE LA RÉALISATION DE SOUS-MARINS ET DE NAVIRES DE SURFACE AINSI QUE DES SYSTÈMES ET INFRASTRUCTURES ASSOCIÉS ET DES SERVICES POUR LES BASES ET CHANTIERS NAVALS, DCNS PROPOSE UN LARGE PANEL DE SOLUTIONS DANS L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE CIVILE ET LES ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES. L'OBJECTIF EST DE RÉALISER À L'HORIZON 2020 UN TIERS DE SON CHIFFRE D'AFFAIRES DANS LES ÉNERGIES, TOUT PARTICULIÈREMENT LES ÉNERGIES MARINES, DANS QUATRE TECHNOLOGIES : LES HYDROLIENNES ET L'ÉNERGIE THERMIQUE DES MERS, LES ÉOLIENNES FLOTTANTES ET LES HOULOMOTEURS (ÉNERGIE DES VAGUES).

En 2003, le changement de statut de la Direction des Constructions Navales a constitué une réforme exemplaire pour cette entreprise dont l'existence remonte à 1631, année de création des premiers arsenaux par le cardinal de Richelieu. L'entrée de Thales au capital de DCNS

en 2007 a donné une nouvelle dynamique à son développement pour créer un acteur majeur du monde naval. Doté d'un périmètre élargi et d'une autonomie renforcée, le nouvel ensemble, en ordre de marche pour développer ses activités et conquérir le monde, est rebaptisé DCNS.

1- DCNS est un acteur majeur de la filière navale en France.

DE RICHELIEU AUX ÉNERGIES MARINES

DCNS est aujourd'hui une société de droit privé à capitaux publics. En ayant forgé très tôt sa capacité à mener des transformations profondes, le groupe a acquis un atout de premier ordre.

Il est rare de voir une entreprise changer aussi profondément et aussi continûment tout en cultivant son héritage. Son patrimoine de près de quatre siècles est humain, technologique et culturel.

En 2013, DCNS a pris le contrôle de la société irlandaise OpenHydro, leader technologique et commercial dans les hydroliennes, ce qui devrait lui permettre de réaliser un chiffre d'affaires d'au moins 1 milliard d'euros à l'horizon 2025 sur le marché des hydroliennes. Cette prise de contrôle a confirmé que le groupe est entré dans la phase industrielle de son activité « énergies marines renouvelables ». En mai 2014, DCNS a conforté sa position dans l'hydrolien en répondant à l'appel à manifestation d'intérêt lancé par l'État français pour l'installation de fermes pilotes d'hydroliennes au large des côtes françaises.

C'est à Cherbourg que le président de la République, François Hollande, avait annoncé en septembre 2013 le lancement de cet appel à manifestation d'intérêt. Et c'est à Cherbourg que DCNS a l'ambition, avec le concours des savoir-faire locaux, de développer une filière industrielle dédiée aux hydroliennes qui pourrait créer à terme un millier d'emplois. L'hydrolienne développée par le groupe fait partie des 34 projets industriels d'avenir dévoilés par le gouvernement en septembre 2013.



© MARC MONTAGNON

2- Virginie Lemière, responsable communication « Énergies et Infrastructures marines ».

3- Schéma de principe d'une ferme hydrolienne.

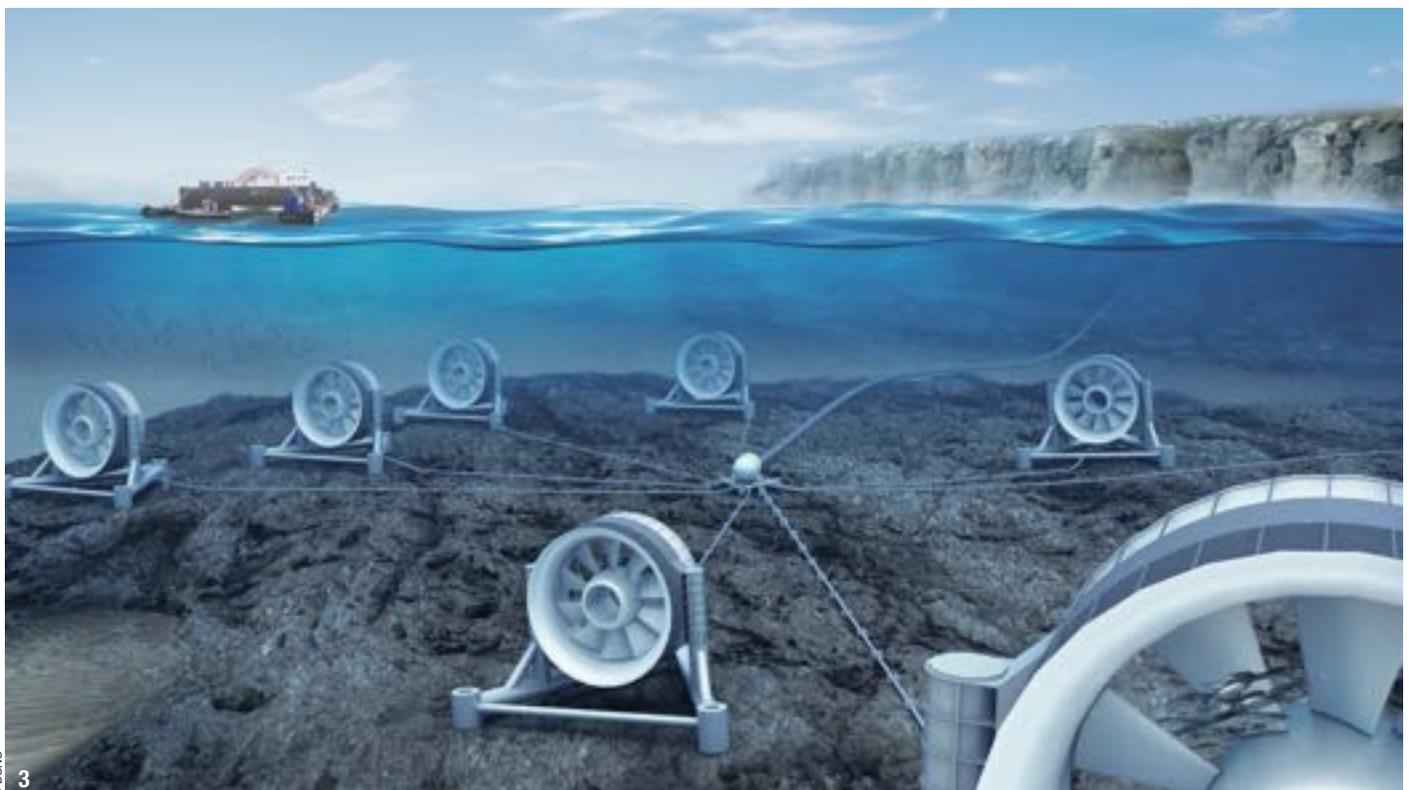
En matière d'éolien flottant, DCNS étudie des solutions techniques et des schémas financiers pour proposer des offres cohérentes. Le groupe compte réaliser un premier démonstrateur multimégawatts en 2017.

Dans le domaine de l'énergie thermique des mers (ETM), DCNS a poursuivi ses travaux sur un projet de centrale ETM en mer en Martinique. Le Groupe a complété sa gamme de produits en présentant en octobre 2013 son nouveau concept de système ETM à terre. Cette solution répondra aux besoins

en électricité de petites infrastructures telles que des entreprises ou des hôtels, et ce d'autant plus qu'elle peut être couplée avec une installation SWAC (*Sea Water Air Conditioning*) de climatisation par eau de mer froide. Dans le domaine de l'énergie des vagues, DCNS a conclu un accord avec l'énergéticien Fortum et la société AW-Energy, avec le soutien de la région Bretagne. Les trois entreprises développeront ensemble au large de la baie d'Audierne un démonstrateur de ferme houlomotrice d'une puissance de 1,5 MW.

1 MILLIARD D'EUROS DANS L'HYDROLIEN EN 2025

La prise de contrôle d'OpenHydro, en mars 2013, a constitué la première opération de croissance externe de l'entreprise dans l'énergie et illustré l'ampleur de la transformation menée par le groupe depuis quatre ans dans le cadre de son projet de croissance. Bordée par la mer d'Irlande, l'océan Atlantique et la mer Celtique, l'Irlande possède un large territoire maritime. C'est dans ce pays que la société OpenHydro a développé une turbine hydrolienne innovante permettant d'obtenir un prix d'électricité compétitif. Les hydroliennes convertissent l'énergie cinétique des courants marins en électricité, comme le font les éoliennes avec le vent. ▶



© DCNS

3



4



5



6



7



8

Ces courants ont pour caractéristiques d'être prévisibles et particulièrement forts : c'est le cas, par exemple du raz Blanchard, au large de Cherbourg, en France, ou de la baie de Fundy, au Canada.

L'eau étant 800 fois plus dense que l'air, ces turbines, significativement plus petites que des éoliennes, permettent toutefois une production comparable. La turbine à centre ouvert OpenHydro est conçue pour être installée directement sur les fonds marins, via une barge spécifique.

Elle relève de la technologie la plus simple, la plus robuste et donc de celle dont la maintenance est la plus aisée à effectuer.

L'hydrolienne est transportée sur son site d'exploitation et assemblée sur la barge avec son support, doté d'un système de tripode intelligent qui s'adapte au fond marin, même dans les zones escarpées, sans fondations additionnelles de génie civil : la turbine se maintient en place par la force gravitaire, ce qui constitue l'un des points forts de la technologie DCNS. Elle peut être installée grâce à ce système unique jusqu'à 50 m de profondeur.

En opération, ces hydroliennes sont silencieuses et invisibles depuis la surface, ce qui minimise les conflits éventuels avec les usagers de la mer tels que les pêcheurs ou la marine marchande. Dans un environnement

4- Une h+ydrolienne OpenHydro à son arrivée dans le port de Cherbourg.

5- L'hydrolienne l'Arcouest sur sa barge sur le site de Paimpol-Bréhat où elle a été testée pendant plusieurs mois.

6- Les hydroliennes sont des turbines sous-marines qui produisent de l'électricité à partir des courants marins.

7- Mise en place de la turbine d'une hydrolienne sur sa barge de transport et d'assemblage.

8- La turbine à centre ouvert OpenHydro est conçue pour être installée directement sur les fonds marins, via une barge spécifique.

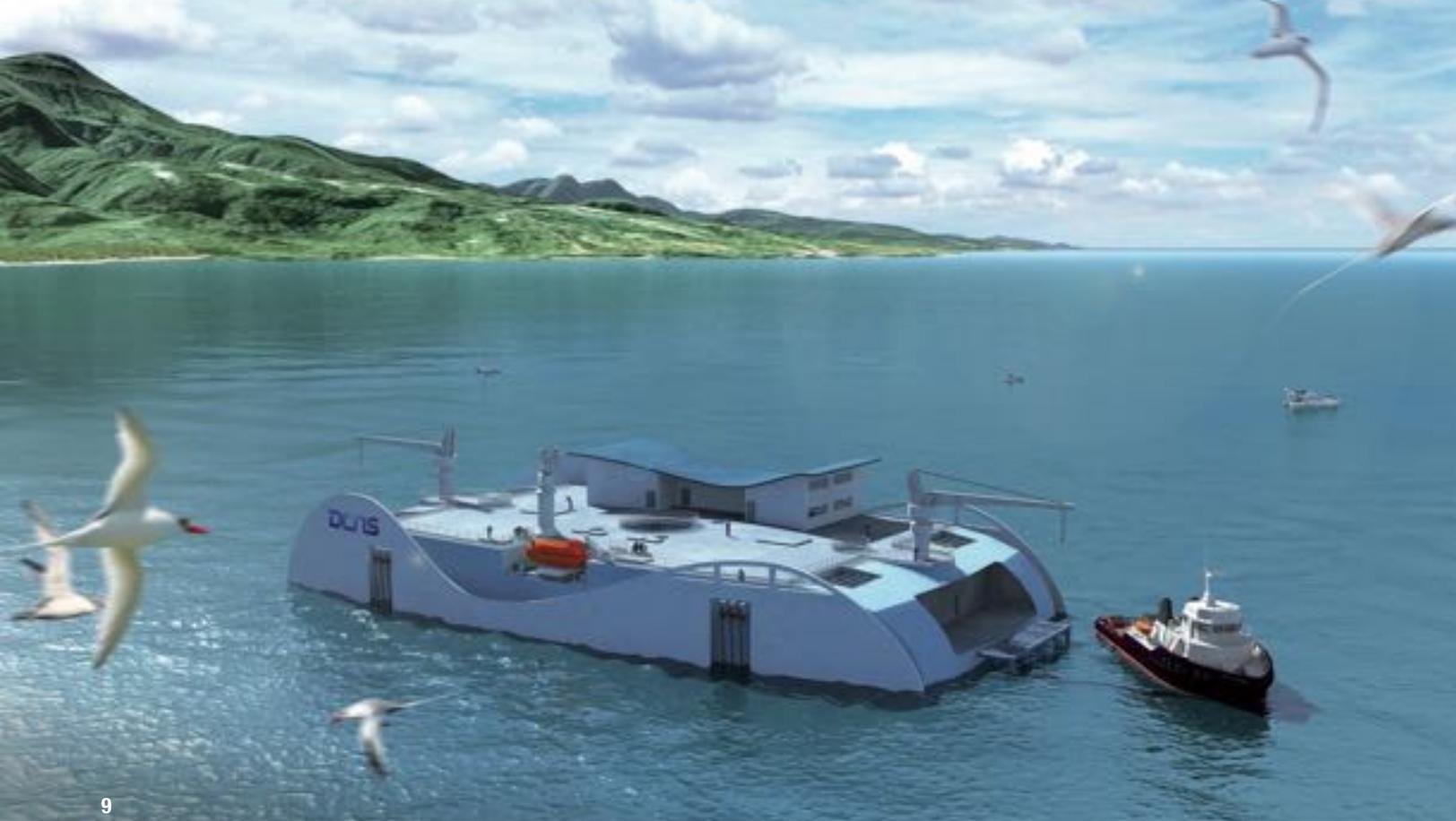
marin, où la fonctionnalité et la durabilité de l'équipement exigent simplicité et robustesse, l'hydrolienne OpenHydro remplit parfaitement ces conditions, grâce à son rotor à vitesse réduite, son fonctionnement sans lubrifiant et son centre ouvert qui minimise son impact sur la vie marine.

DES TESTS EN LABORATOIRE « MARIN » À LA FERME PILOTE DE PAIMPOL-BRÉHAT

La turbine OpenHydro a déjà fait l'objet de plusieurs phases de tests qui ont permis de valider ses performances.

7 machines ont déjà été testées dans le centre d'essais EMEC (European Marine Energy Center) dans les îles Orcades, au large de l'Écosse. C'est dans ce centre qu'Openhydro teste des machines de 6 m de diamètre depuis 2006.

Les tests conduits sur ces machines de petite taille ont permis la réalisation d'un prototype « grandeur nature » de 16 m : L'Arcouest. Ce prototype a fait l'objet de tests en conditions réelles sur le site de Paimpol-Bréhat, dans les Côtes d'Armor. Après quatre mois d'expérimentation, l'hydrolienne L'Arcouest a été relevée avec succès par les équipes de DCNS et d'OpenHydro. Ces essais concluants ont permis de



9

© DCNS

démontrer les performances de l'hydrolienne en termes de rendement et de fonctionnement, validant le principe du prototype de 16 mètres, étape indispensable avant le développement de fermes pilotes.

L'Arcouest avait été immergée à une quarantaine de mètres de profondeur en décembre 2013.

Pendant quatre mois, les équipes du groupe ont étudié son comportement. L'hydrolienne a fait l'objet de nombreuses mesures, électriques et mécaniques. Au total, la turbine a tourné 1 500 heures en continu (contre 500 heures initialement attendues). Ces résultats ont démontré le bon fonctionnement de ce prototype.

À l'issue de cette phase d'essais, EDF a commandé en juin 2014 deux nouvelles turbines à DCNS pour équiper la ferme pilote qui va être installée à Paimpol-Bréhat et qui sera opérationnelle dès 2015.

Le développement de cette ferme pilote a pour ambition de démontrer la faisabilité technique, économique et environnementale de la filière hydrolienne. DCNS et EDF vont pouvoir tester le bon fonctionnement des deux turbines raccordées au réseau. C'est une étape indispensable avant le déploiement à partir de 2016 de fermes pré-commerciales et le développement d'une filière industrielle de l'hydrolien en France.

FERMES PRÉ-COMMERCIALES MULTIMÉGAWATTS : DERNIÈRE ÉTAPE

Les fermes pré-commerciales multimégawatts constitueront la dernière étape avant la création d'une filière industrielle.

9- Vue sur site d'une installation d'Énergie Thermique des Mers offshore (ETM).

10- Une ferme houlomotrice WaveRoller® : produire de l'électricité à partir du mouvement des vagues.

En parallèle du projet de Paimpol-Bréhat, DCNS et sa filiale OpenHydro vont fournir deux hydroliennes pour équiper une ferme pilote de 4 MW en baie de Fundy, au Canada.

En effet, DCNS a remporté l'appel d'offres lancé par le Ministère de l'énergie de la Nouvelle Écosse (Nova Scotia), concernant le développement de l'industrie des hydroliennes sur le site expérimental du Centre de recherche

FORCE (Fundy Ocean Research Centre for Energy) dans la baie de Fundy.

Le groupe va donc procéder au déploiement, près d'Halifax, d'une ferme pilote d'hydroliennes d'une puissance de 4 MW, qui sera intégralement raccordée au réseau électrique en 2015. Ce système innovant sera composé de deux turbines de 16 m (2,0 MW).

À terme, ce sera le premier système au monde d'hydroliennes interconnectées d'une capacité de plusieurs mégawatts. Il permettra de fournir de l'électricité à plus de 1 000 habitants de la Nouvelle-Écosse.

Ce projet sera réalisé par un consortium dirigé par OpenHydro conjointement avec la société d'énergie Emera basée en Nouvelle-Écosse. Les principaux partenaires industriels régionaux qui prendront part au projet sont Irving Shipbuilding, Irving Équipement et Atlantic Towing.

En France, DCNS a répondu avec EDF Energies Nouvelles à l'appel à manifestation d'intérêt lancé par le gouvernement pour l'installation de fermes pilotes d'hydroliennes. Leur projet « Normandie Hydro » prévoit l'installation d'ici 2016 dans le raz Blanchard de 7 hydroliennes de 2 MW chacune. Si ce projet est retenu, il permettra de valider le principe de ferme hydrolienne avant le déploiement commercial.

HORIZON 2020 : DES FERMES COMMERCIALES

Les premières fermes commerciales d'hydroliennes devraient voir le jour dès 2020. En France, DCNS a l'ambition de développer une ferme commerciale de 150 machines dans le raz Blanchard, qui permettrait de produire 300 MW. ▷

© DCNS



10

WAVEROLLER® : COMMENT ÇA MARCHE ?

La technologie Wattmor permet de produire de l'électricité à partir du mouvement des vagues par l'intermédiaire de panneaux WaveRoller®. Un panneau pivotant est immergé dans les zones proches du littoral. Sous l'effet de la houle, le panneau oscille et bat avec le va-et-vient des vagues. Le mouvement mécanique ainsi créé alimente un système hydraulique qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique. L'installation est connectée au réseau électrique par un câble sous-marin.



Le déploiement de cette ferme ferait de Cherbourg le fer de lance d'une filière des hydroliennes dans le pays et entraînerait la création d'une usine de fabrication et de 1 000 emplois localement. En effet, les dimensions des turbines hydroliennes imposent de les assembler et de les entretenir au plus près des zones où elles seront exploitées. Des sites industriels seront donc créés dans les régions où DCNS sera maître d'œuvre de fermes d'hydroliennes. Une convention a déjà été signée entre DCNS et Ports Normands Associés pour pré-réserver des espaces sur le port de Cherbourg en vue de la création d'une future usine. En attendant l'appel d'offres du gouvernement français pour des fermes commerciales d'hydroliennes, DCNS et sa filiale OpenHydro ont un premier projet dans le raz Blanchard, au large de l'île anglo-normande d'Aurigny (Alderney en anglais). En effet, OpenHydro et Alderney Renewable Energy (ARE) ont signé en avril 2014 un accord pour la création d'une joint-venture, Race Tidal Ltd. Les deux sociétés vont unir leurs compétences et leurs ressources pour la création d'ici 2020 d'une ferme hydrolienne d'une capacité de 300 MW près d'Aurigny. Les eaux territoriales d'Aurigny disposent d'un des plus gros potentiels au monde en matière d'énergie hydrolienne. Ce potentiel pourrait permettre à terme l'alimentation en énergie de 1,5 million de foyers. Première étape dans l'exploitation de cette ressource exceptionnelle, la ferme hydrolienne développée par OpenHydro et ARE comptera 150 turbines de 2 MW chacune qui produiront de l'électricité pour plus de 150 000 foyers. L'accord entre ARE et OpenHydro s'inscrit en cohérence avec le projet FAB Link Limited,

joint-venture entre ARE et Transmission Investment LLP qui doit permettre de réaliser une interconnexion électrique entre la France, Aurigny et la Grande-Bretagne. Cette interconnexion permettra l'exportation de l'électricité produite par la ferme hydrolienne d'Aurigny vers les réseaux européens. Elle permettra notamment l'échange d'énergie entre la France et la Grande-Bretagne. Au Canada, après le développement de la ferme pilote d'hydroliennes en baie de Fundy, le consortium mené par OpenHydro et Emera a l'intention de développer une filière industrielle d'hydroliennes dans la région et ambitionne de réaliser une ferme commerciale d'une capacité de 300 MW dès 2020.

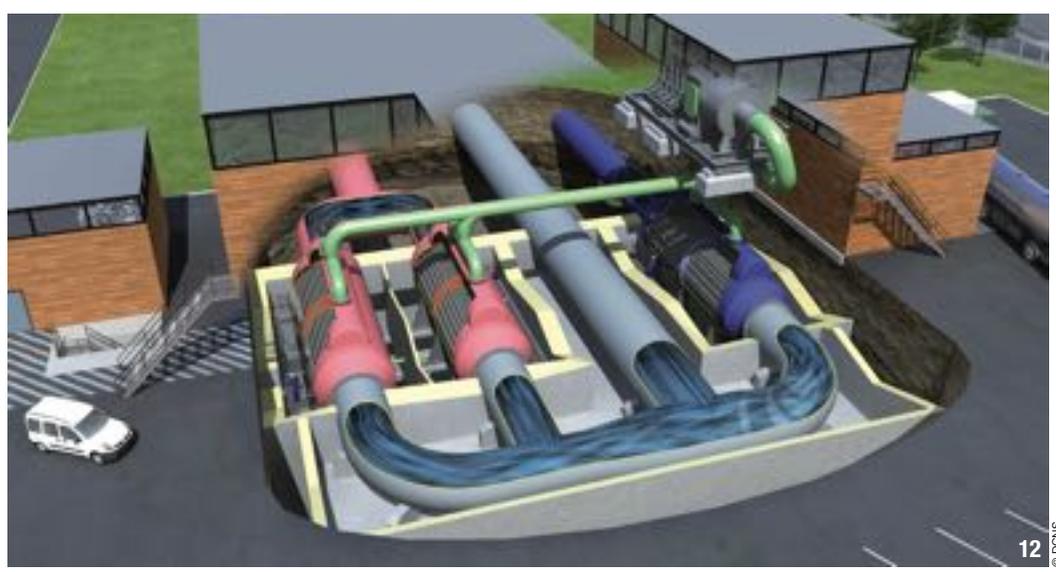
**ÉOLIEN FLOTTANT :
DES OPPORTUNITÉS IMMENSES**

En décembre 2013, le gouvernement français a lancé une demande d'information en vue d'exploiter le potentiel

- 11- Principe d'implantation d'une centrale ETM à terre (onshore).**
- 12- Schéma de principe d'une centrale d'Énergie Thermique des Mers (ETM) à terre (onshore).**

français de l'éolien en mer flottant. Cette première étape constitue un pas important vers la réalisation de fermes pilotes à partir de 2019 puis de fermes commerciales pouvant aller jusqu'à 100 machines à partir de 2022. Fort de sa connaissance du milieu marin, élément essentiel pour le développement de cette technologie, DCNS a pour ambition de jouer un rôle clé sur ce nouveau marché : un premier démonstrateur multimégawatts pourrait

être réalisé en 2017. Les éoliennes flottantes permettent l'accès à des zones aujourd'hui inexploitées et ouvrent ainsi des opportunités de marché immenses, trois fois plus importantes que l'éolien offshore traditionnel. En France, l'éolien flottant pourrait, d'ici à 2020, avec un parc de 500 MW en Bretagne, alimenter 10% des besoins énergétiques de cette région. En 2030, le marché français pourrait passer à dix parcs. En Europe, le potentiel est également très important, puisque l'éolien flottant pourrait représenter, en 2030, 15% de la production électrique totale produite à partir d'éoliennes installées en mer. Dans certains pays dont les côtes sont adaptées à cette technologie, la proportion pourrait atteindre plus de 30%. À terme, la production mondiale pourrait atteindre 100 parcs, soit 50 gigawatts par an, soit l'équivalent de 40 réacteurs nucléaires.





13

© DCNS

DANS LES EAUX TROPICALES : L'ETM

Il est un autre domaine dans lequel DCNS offre une solution énergétique unique pour les îles et les zones isolées de la ceinture intertropicale : c'est celui de l'énergie thermique des mers (ETM) dont le principe est basé sur le cycle thermodynamique de Rankine permettant la production d'énergie grâce à la différence de température entre une source chaude et une source froide. L'ETM utilise la différence de températures des mers tropicales de 20°C, existant naturellement entre l'eau de surface à environ 25°C et l'eau profonde (- 1 000 m) à environ 5°C pour produire de l'électricité.

Il s'agit d'une énergie produite en continu, soit à partir d'une centrale à terre de 6 MW implantée en bordure de côte, soit à partir d'une centrale en mer flottante de 16 MW, ancrée au large des côtes.

13- L'éolien flottant pourrait, d'ici à 2020, avec un parc de 500 MW en Bretagne, alimenter 10 % des besoins énergétiques de cette région.

14- Le groupe DCNS conçoit, réalise et maintient en service des sous-marins et des navires de surface.

Les travaux de recherche et développement menés par DCNS ces cinq dernières années sur une solution ETM grande puissance flottante au large des côtes ont permis de développer un nouveau concept à terre qui peut produire

3 à 6 mégawatts d'électricité. Cette nouvelle solution répond aux besoins en électricité de petits réseaux ou infrastructures telles que des entreprises ou des hôtels. Le groupe est aujourd'hui prêt à répondre à des appels d'offres pour l'installation de centrales à terre.

LES VAGUES : UNE ÉNERGIE ENCORE INEXPLOITÉE

Plus de 150 technologies houlomotrices sont actuellement à l'étude à travers le monde. De son côté, DCNS a décidé de tester plusieurs solutions et travaille avec 34 pays disposant d'un fort potentiel en matière d'énergie des vagues.

Le groupe travaille notamment avec l'énergéticien Fortum pour développer en Bretagne un projet de ferme pilote d'énergie des vagues produisant des watts à partir de la mer, d'où son nom de Wattmor. Le projet consiste à fabriquer et installer à l'horizon 2017

une ferme pilote de 3 à 5 unités dans la baie d'Audierne. Les partenaires de Wattmor sont Fortum, énergéticien finlandais pionnier de l'énergie durable, AW-Energy, société finlandaise développant les panneaux oscillants Wave-Roller®, DCNS et la Région Bretagne, qui apportera un soutien financier dans le cadre de sa politique en faveur du développement des énergies marines, inscrite par ailleurs dans le Pacte d'Avenir pour la Bretagne.

Avec l'ensemble de ces solutions « marines », DCNS se positionne désormais comme un acteur majeur des énergies maritimes renouvelables tout en poursuivant son développement sur les marchés de l'énergie nucléaire civile et des services aux énergies et infrastructures marines.

Que de chemin parcouru dans le monde naval depuis la création, en 1631, des premiers arsenaux par le cardinal de Richelieu ! □



© DCNS

14

DCNS : LES CHIFFRES 2013

3,4 milliards d'euros de chiffre d'affaires

13 648 collaborateurs

40 % du chiffre d'affaires à l'export

700 collaborateurs à l'international

40 000 emplois dans la filière navale en France

IMPLANTATIONS EN FRANCE : Cherbourg, Brest, Lorient, Nantes, Ruelle (Angoulême), Marseille, Toulon, Saint-Tropez, Le Mourillon (Var)

FILIALES ET JOINT VENTURES : DCNS Canada, DCNS do Brazil, DCNS Far East (Singapour), DCNS India, DCNS Malaysia, DCNS Support (Arabie Saoudite), Prosin (filiale à 100% de DCNS Brazil), Sirehna (France), Openhydro (Irlande), Défense Environnement Services (France), Kership (France), Itaguai Construções Navais (Brésil), Boustead DCNS Naval Company (Malaisie)



1
© HAPPYDAY - JEAN-LOUIS BURNOD

RÉSERVOIRS GNL DU TERMINAL MÉTHANIER DE DUNKERQUE

AUTEURS : PIERRE RENIER, RESPONSABLE ÉTUDES EDF COFIVA - PHILIPPE VAILLANT, DIRECTEUR DE PROJET BOUYGUES TP - JÉRÔME THIERCAULT, DIRECTION TECHNIQUE INGÉNIERIE, BOUYGUES TP - LOUIS MARRACCI, DIRECTION TECHNIQUE, BUREAU D'ÉTUDES BOUYGUES TP

DUNKERQUE LNG, FILIALE D'EDF, FLUXYS ET TOTAL, A CONFIE AU CONSORTIUM ENTREPOSE PROJETS - BOUYGUES TP LA RÉALISATION DE 3 RÉSERVOIRS DE STOCKAGE DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ (GNL) SUR LE SITE DU TERMINAL MÉTHANIER DE DUNKERQUE. LE MARCHÉ COMPREND L'INGÉNIERIE, LES ACHATS, LA CONSTRUCTION ET LES ESSAIS POUR LA MISE EN SERVICE. CHAQUE RÉSERVOIR A UNE CAPACITÉ NETTE DE 190 000 M³ ET MESURE 92 M DE DIAMÈTRE POUR 50 M DE HAUT. CES RÉSERVOIRS SERONT LES PLUS GRANDS CONSTRUITS EN EUROPE.

INTRODUCTION

CONTEXTE

Le 27 juin 2011, Dunkerque LNG, filiale d'EDF, Fluxys et Total a décidé la construction du terminal méthanier de Dunkerque, deuxième plus important chantier industriel en cours en France. Le terminal méthanier de Dunkerque a pris corps dans un contexte de dépendance accrue de l'Europe et de la France en particulier, aux importations de gaz naturel hors de l'Union européenne, cela même dans la perspective

de l'extinction de la production de gaz conventionnel en Mer du Nord.

Il comporte ainsi une dimension stratégique qui lui donne une envergure nationale et européenne. Il doit en effet conduire à l'ouverture d'une source d'approvisionnement flexible en énergie primaire, à proximité d'une zone de grande consommation, dans un contexte de tension sur les marchés de l'énergie. Concrètement :

→ Il sera raccordé, cas unique, à deux marchés : France et Belgique ;

1- Vue générale des réservoirs en construction.

1- General view of the tanks under construction.

- Il renforcera la présence sur les marchés du gaz d'un opérateur crédible, EDF, et de ses partenaires européens à ses côtés.
- Le terminal méthanier de Dunkerque se composera des installations suivantes :
 - Un poste de déchargement qui accueillera, par an, environ 80 méthaniers d'une capacité pouvant aller jusqu'à 270 000 m³ ;
 - Un système de déchargement du Gaz Naturel Liquéfié (GNL) ;
 - Trois réservoirs cryogéniques de
- Il permettra une amélioration significative de la concurrence sur le marché de la fourniture de gaz ;

stockage de GNL d'une contenance de 190 000 m³ chacun ;

- Une unité de re-gazéification ;
- Une prise d'eau de mer destinée au réchauffement du GNL : une partie des eaux tièdes de la centrale nucléaire de Gravelines sera utilisée pour réchauffer le GNL via un tunnel de 5 km sous l'avant-port Ouest de Dunkerque ;
- Un raccordement au réseau de transport de gaz.

Avec une capacité annuelle d'accueil de 13 milliards de m³ de gaz (environ 20% de la consommation annuelle française et belge de gaz naturel), le terminal méthanier de Dunkerque sera le 2^e plus important d'Europe.

Dans le cadre de la construction de ce terminal qui représente un investissement de plus d'un milliard d'euros, le consortium formé par Entrepose Projets et Bouygues TP s'est vu attribuer la réalisation en conception construction des trois réservoirs cryogéniques.

Ces réservoirs seront les plus grands jamais construits en Europe.

Le terminal s'implante sur le site du Clipon, dune artificielle créée il y a une trentaine d'années lors de la création de l'avant-port Ouest de Dunkerque, sur la commune de Loon-Plage.

Les maîtres d'ouvrage (Dunkerque LNG et Grand Port Maritime de Dunkerque) ont procédé à toutes les concertations nécessaires au plan local.

La prise en compte des préoccupations exprimées lors du débat public qui s'est tenu en 2007 et leur souci de faire de cet investissement un exemple d'intégration des contraintes environnementales dans un grand projet industriel les ont conduits à des choix techniques majeurs quant à la localisation du terminal (décalage vers l'ouest de la plate-forme pour épargner entièrement les zones les plus sensibles en termes de biodiversité) et à des mesures de compensation.

Le choix a, en outre, été fait d'une solution de re-gazéification sans production

de CO₂, en utilisant une partie des eaux tièdes provenant du rejet de la centrale nucléaire de Gravelines.

NATURE DE L'OUVRAGE ET PÉRIMÈTRE À LA CHARGE DU GROUPEMENT ENTREPOSE PROJETS ET BOUYGUES TP

Les réservoirs sont de type « à intégrité totale » et conçus conformément à la norme NF EN 14 620. Ils sont constitués de :

- Une cuve interne autoportante qui contient directement le liquide à température cryogénique (première barrière de rétention), faite d'acier cryogénique à 9% de nickel ;

- Une isolation permettant de limiter le taux d'évaporation du contenu liquide de la cuve interne ;

- Une cuve externe permettant de protéger le contenu contre les agressions extérieures (actes de malveillance, impacts de projectiles, chute de petits aéronefs, incendie extérieur, explosion à proximité, etc.) et de contenir une éventuelle fuite de la cuve interne. Elle est constituée d'une enceinte en béton armé précontraint, directement liée et construite sur le radier en béton du réservoir, couronnée d'un dôme hémisphérique en béton armé.

Cette cuve constitue une deuxième barrière de rétention au GNL et aux gaz d'évaporation (pour ce faire les faces internes de cette cuve sont revêtues d'un chemisage en acier lui conférant la propriété d'étanchéité aux gaz d'évaporation requise) ;

- Une plateforme en béton armé implantée sur le dôme, supportant les tuyauteries et permettant l'accès aux divers instruments et la dépose des pompes lors des opérations de maintenance (l'absence de pénétrations latérales à la base du réservoir, évitant toute perte de confinement en cas de rupture au niveau des piquages, impose de faire passer toute les lignes de tuyauteries par le toit du réservoir).

Ces ouvrages de grandes dimensions (93 m de diamètre et 51 m de haut) sont implantés sur des remblais hydrauliques (mis en place au cours des années 70) surmontant des sables quaternaires en dessous desquels se trouve la formation régionale d'Argile des Flandres d'une épaisseur de 70 à 90 m. Cette argile est susceptible d'induire des tassements à long terme de la structure.

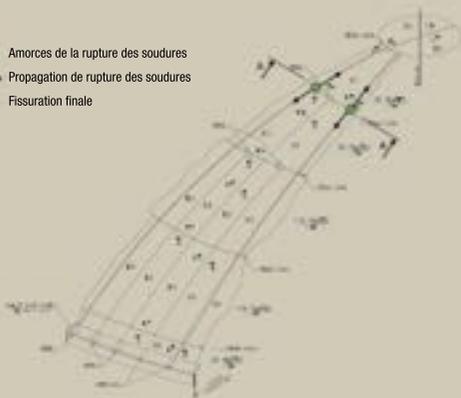
Dans le cadre du contrat et du groupement, le périmètre des activités à la charge de Bouygues TP couvre : ▷

2- Cinématique simplifiée de frangibilité du dôme.

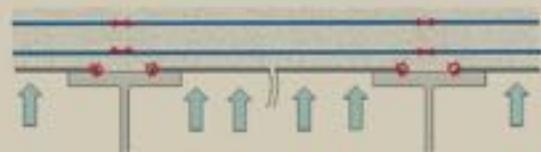
2- Simplified kinematic drawing of the dome's fragility.

CINÉMATIQUE SIMPLIFIÉE DE FRANGIBILITÉ DU DÔME

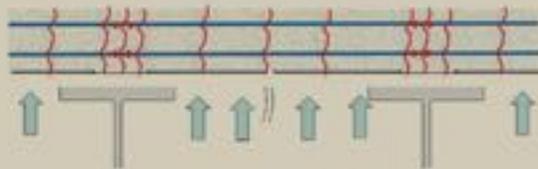
- Amorces de la rupture des soudures
- Propagation de rupture des soudures
- Fissuration finale



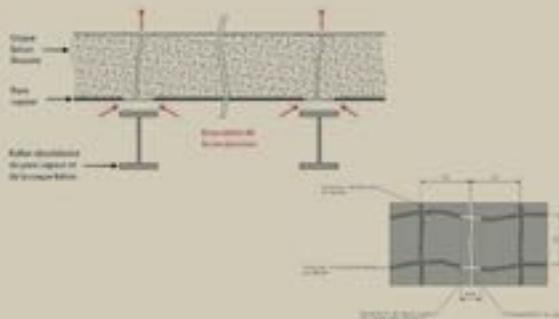
Rupture des soudures et redistribution de la tension dans le ferrillage



Plastification / grande déformation du ferrillage



Fissuration du dôme au droit des chevrons



- L'étude générale du réservoir et de sa tenue au séisme ;
- L'étude et la réalisation des améliorations de sol ;
- L'enveloppe externe des réservoirs en béton précontraint ou en béton armé (radier, voile et dôme) ;
- La réalisation du génie civil des plateformes en béton armé.

DIMENSIONNEMENT DES RÉSERVOIRS

ORGANISATION DES ÉTUDES

Les études ont été menées en étroite collaboration avec les équipes d'Entrepose Projets en charge de la conception du liner en acier de la cuve externe, du réservoir intérieur, de son isolation thermique et des différents équipements internes et externes.

Les nombreuses interfaces (géométrie des structures respectives, présence d'inserts, séquence de réalisation...) ont ainsi été calées par des équipes expérimentées dans le domaine.

La conception des structures en béton a été réalisée en propre par les équipes de la Direction Technique de Bouygues TP.

Les méthodes constructives des ouvrages en béton ont également été réalisées en propre par les équipes de Bouygues TP.

Les études menées par le Groupement ont été supervisées par Cofiva, filiale d'EDF et Assistant au Maître d'Ouvrage Dunkerque LNG. Pour ce faire, Cofiva s'est appuyé sur l'ensemble des compétences techniques disponibles au sein du Groupe EDF.

ÉLÉMENTS DIMENSIONNANT

En service normal, l'enveloppe doit assurer l'étanchéité du réservoir et résister aux effets d'une surpression intérieure pouvant atteindre 290 mbarg ou d'une dépression intérieure de 10 mbarg.

Les calculs et le choix des matériaux tiennent compte des événements accidentels qui pourraient se produire. Ainsi l'enveloppe en béton doit pouvoir résister à :

- Un effet de souffle résultant d'une explosion d'une pression maximum de 200 mbarg ;
- L'impact (sur le voile ou le dôme) d'une vanne de 50 kg ayant une vitesse à l'impact de 160 km/h ;
- L'impact sur le dôme d'un réacteur de Cessna de 200 kg ayant une vitesse à l'impact de 360 km/h ;
- La chute accidentelle à l'intérieur du puits de pompe d'une pompe immergée de 1 800 kg causée par la rupture

simultanée des deux câbles de levage de la pompe et d'une erreur humaine lors de l'opération de manutention de cette pompe ;

→ Un séisme OBE de 0,14 g d'accélération maximale à la surface du sol (scénario pour lequel le réservoir doit rester pleinement opérationnel) ;

→ Un séisme SMS de 0,30 g d'accélération maximale à la surface du sol (scénario pour lequel le réservoir peut subir des dommages, mais aucune fuite dans l'environnement ne doit être observée) ;

→ Une fuite majeure du réservoir intérieur (scénario sous lequel l'épaisseur de béton comprimée doit être au moins de 10 cm, cette zone devant présenter une compression moyenne minimale de 1 MPa, de manière à assurer une bonne étanchéité de la structure) ;

→ Les radiations thermiques résultant des divers scénarii d'incendie ;

→ Un sur-remplissage de la cuve interne consécutif à une défaillance de l'ensemble des systèmes de sécurité conjuguée à des erreurs humaines d'opération.

DIMENSIONNEMENT D'UN DÔME FRANGIBLE

Un des principaux défis techniques du projet a été de répondre à une exigence particulière des autorités françaises qui imposaient de dimensionner les réservoirs en tenant compte de l'ensemble des scénarii « non physiquement impossibles ». Il a ainsi été nécessaire de considérer l'éventualité d'un sur-remplissage de ceux-ci, causés par la défaillance successive :

- De l'opérateur ;
- Des alarmes de niveaux (au nombre de trois) et des systèmes de rétro-contrôle associés ;
- Du signal ESD de fermeture des vannes installées sur les lignes d'alimentation ;
- Des soupapes de surpression.

Dans ce cas accidentel, non pris en compte habituellement sur ce type de projet :

→ Le GNL déborde de la cuve interne, remplit l'espace inter-barrières, s'évapore partiellement, entraînant une augmentation rapide de la pression interne ;

→ Il est demandé de prendre des dispositions afin de maintenir le confinement du GNL :

- Le radier et le voile doivent rester intègres,

- Une frangibilité du dôme doit s'opérer dans une gamme de pression prédéterminée (suffisamment élevée pour présenter une marge de sécurité vis-à-vis de la pression de service, mais suffisamment faible pour ne pas générer une onde de surpression trop importante, tout cela sans avoir recours à des systèmes

mécaniques type disques de rupture). Cette ouverture permet d'évacuer la surpression interne, et ainsi d'éviter l'endommagement du reste de la structure (figure 2).

CALCUL PRÉVISIONNELS DES TASSEMENTS AVEC PRISE EN COMPTE DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ DE L'ARGILE DES FLANDRES

Les charges apportées par les réservoirs conduisent à des pressions importantes sous le radier de ceux-ci, notamment en phase d'épreuve hydraulique, où elles varient entre 270 kPa (partie courante du radier) et 370 kPa (partie annulaire du radier située au droit du voile).

Les réservoirs GNL sont des structures très sensibles aux tassements différentiels (courbure de la dalle) et absolus (connexion des tuyauteries à la structure).

Une attention toute particulière a été portée à l'estimation des tassements pour différents cas de charges. Ces calculs ont été menés par Terrasol. Ceux-ci ont été réalisés au moyen de modèles aux éléments finis (logiciel Plaxis) dans lequel :

→ Le comportement des Argiles des Flandres est modélisé par une loi élasto-plastique avec critère de rupture de Mohr-Coulomb ;

→ Le comportement des sables a été modélisé par des lois de type HSM permettant de prendre en compte le comportement non-linéaire et irréversible du sol ;

3- Vue des réservoirs en construction.

3- View of the tanks under construction.





→ Les modules de déformation utilisés sont déduits des mesures des tassements au droit des ouvrages de la centrale CNPE de Gravelines (située en vis-à-vis du projet de terminal méthanier, de l'autre côté du bassin de l'Avant-Port Ouest), ajustés à l'aide de la courbe de variation du module avec le taux de déformation $E = f(\epsilon)$. L'ordre de grandeur du tassement cumulé sous remplissage moyen après cinquante ans est de l'ordre de 30 cm (dont 5 cm acquis à la fin de la construction), le tassement différentiel entre le centre et la périphérie du réservoir n'étant que de l'ordre de 6 cm. La correcte estimation des tassements à long terme est aussi une donnée d'interface capitale afin d'assurer le bon comportement des lignes de tuyauteries connectées au réservoir et réalisées par le groupement en charge du terminal.

COMPORTEMENT SISMIQUE

Plusieurs modèles sismiques ont été réalisés :

→ Un modèle tridimensionnel « sol », dont le but est la détermination des impédances de sol (étude menée par Géodynamique et Structures) ;

→ Un modèle « brochette », dont le but est la détermination de la réponse globale de la structure composite et tenant compte du comportement du gaz liquéfié représenté par une composante convective, une composante impulsive et un mode de respiration vertical ;

→ Un modèle tridimensionnel « sol + radier + brochette » dont le but est la détermination des efforts sismiques dans le radier. En effet, on ne peut déduire ceux-ci du modèle brochette, qui suppose que le radier est infiniment rigide, ce qui n'est pas tout à fait le cas

4- Centrales à béton.

5- La continuité des accès lors des opérations de hissage.

4- Concrete mixing plants.

5- Continuity of access during hoisting operations.

(i.e. la partie centrale présente une épaisseur réduite de 50 cm) ;

→ Un modèle tridimensionnel « brochette + dôme + plateforme » dont le but est la détermination des efforts sismiques dans le dôme et la plateforme béton.

Par modèle « brochette » s'entend un modèle filaire constitué de masses ponctuelles à plusieurs degrés de liberté soumis à une analyse modale spectrale, utilisant les spectres de réponse horizontaux et verticaux définis par Dunkerque LNG.

AMÉLIORATION DE SOL

Un précédent article paru dans le numéro 897 (2013) de la revue *Travaux* en décrit les principes.

FORMULATION ET PRODUCTION DES BÉTONS DES BÉTONS DE STRUCTURES DEVANT RÉPONDRE À DES EXIGENCES ALLANT BIEN AU-DELÀ DE CE QUI EST USUELLEMENT REQUIS DANS LE MONDE DU GNL

Les bétons de structure ont dû répondre à des spécifications très poussées

afin de satisfaire à la fois :

→ Les exigences des réservoirs cryogéniques ;

→ Les exigences liées à l'environnement marin dans lequel l'ouvrage sera implanté ;

→ Les exigences complémentaires imposées par Dunkerque LNG, basé sur le retour d'expérience d'EDF dans le domaine nucléaire ;

→ La garantie d'une mise en œuvre adaptée à chaque partie d'ouvrage. Les principales caractéristiques visées se résument comme suit :

→ Béton précontraint : C50/60 ; Résistance à la traction $> 4,1$ MPa ; Module élastique > 37 GPa ;

→ Classe d'exposition XS3 ;

→ Liant équivalent ≥ 400 kg ;

→ Eeff/Leq $\leq 0,4$;

→ Contraintes de durabilité :

- Niveau de prévention Ds pour la RSI,

- Niveau de prévention C pour la RAG,

- Porosité (NF P 18-459) $\leq 13\%$,

- Diffusion aux ions chlorures (NTB 492) $\leq 5.10^{-12}$ m²/s,

- Perméabilité à l'eau (NFP 18-855) $\leq 0,5.10^{-18}$ m²,

- Perméabilité à l'eau (EDF TEGG) $\leq 1,0.10^{-11}$ m²,

- Perméabilité à l'air (mode opératoire AFPC-AFRMEM) $\leq 10^{-16}$ m²,

- Taux de chlorure sur béton $\leq 0,1\%$,

- Taux de sulfure sur béton $\leq 0,5\%$,

- Contraintes thermiques : température maximale à cœur ≤ 65 °C, différence de température entre le cœur et la surface ≤ 40 °C.

Ces exigences de formulation ont été doublées de contraintes de mise en œuvre :

→ Pour tenir des cadences élevées sur les voiles, les bétons devaient atteindre une résistance suffisante au jeune âge,

pour permettre une reprise des travaux sur la levée suivante le lendemain du coulage (accès pour ferrailage de la levée suivante) ;

→ Pour pouvoir être pompés et coulés dans des zones où la densité d'armature est forte, les bétons devaient être également suffisamment fluides.

FORMULES BÉTON

Compte tenu des exigences techniques portant à la fois sur la durabilité, la performance mécanique, la maîtrise du dégagement thermique du béton et la garantie d'une mise œuvre adaptée sur chaque partie d'ouvrage, plus de 10 mois d'étude ont été nécessaires pour la mise au point du béton du radier, des voiles et du dôme.

Dans ce contexte, plusieurs formules ont été établies pour assurer la robustesse des formules et permettre la tenue du planning :

→ Sans addition ;

→ Avec addition de type filler calcaire ;

→ Avec addition de type cendres volantes.

L'option liant équivalant à base de cendres volantes est apparue comme le meilleur compris pour répondre à l'ensemble des spécifications.

L'anticipation et le contrôle de l'exothermie du béton ont pu être appréciés par simulation thermique préalable, puis vérifié sur la maquette et *in situ*.

La formule béton employée pour les voiles se résume comme suit :

→ Ciment de type CEM1 42.5 R CE PM CP2 NF ;

→ Cendres volantes inférieures à 20 % du poids de liant ;

→ Deux sables : un sable marin (à taux réduit en chlorure) et un sable de carrière ;

→ Agrégats 4/14 mm et 12,5/20 mm concassés ;

→ Adjuvants compte tenu du rapport inférieur à $E/C = 0,38$.

CENTRALES À BÉTON

La production de béton a été réalisée sur site par deux centrales indépendantes :

→ Une Centrale Couvrot Master 3000 d'un débit théorique de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ pourvue d'un malaxeur à axe horizontal de $2,0 \text{ m}^3$;

→ Une Centrale Couvrot Master 4000 d'un débit théorique de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ pourvue d'un malaxeur à axe horizontal de $2,7 \text{ m}^3$.

Le stock de matériaux a été établi pour garantir le coulage de 900 m^3 sans réapprovisionnement, de manière à obtenir le coulage des levées du voile cylindrique par anneau complet.

On notera par ailleurs qu'une attention toute particulière a été portée au respect de l'environnement (objectif zéro rejet d'eau dans le milieu) et à la préservation de la ressource en eau.

Pour ce faire, des systèmes de traitement performants ont été mis en place (trois décantations primaires, lessivage des rebuts de béton frais, récupération des granulats, filtre-pressé, système de traitement du PH, etc.).

Soulignons que la présence sur site des centrales à béton (figure 4) ainsi que du laboratoire béton a permis d'assurer la qualité et la réactivité nécessaire.

PRINCIPAUX FOURNISSEURS

- Coffrages : Simpra,
- Centrales : Couvrot,
- Ciments : Cimlux,
- Adjuvants : BASF CC.

EXÉCUTION DES TRAVAUX ORGANISATION DES TRAVAUX

La réalisation des structures en béton a été réalisée en propre par les équipes de Bouygues TP.

La qualification des méthodes de mise en œuvre.

À la demande de Dunkerque LNG, l'ensemble des techniques de mise en œuvre pour la construction de l'enceinte béton des réservoirs a été préalablement testé et validé sur une maquette partielle de réservoir à l'échelle 1.

Cette maquette, d'une dimension totale de 8 m de long par 9 m de haut se compose d'une portion de radier connectée au voile (2 levées) lui-même connecté à une portion de dôme.

Cette maquette est représentative des zones pour lesquelles le bétonnage est le plus complexe (forte densité d'armatures, présence de gaines de



© BOUYGUES TP

précontrainte, présence d'inserts, etc.). La réalisation de cette maquette a permis de tester les différentes méthodologies de mise en œuvre avant leur emploi sur l'ouvrage final afin d'assurer l'adéquation des méthodes et moyens mis en œuvre avec les contraintes imposées par l'ouvrage.

Cette maquette a par ailleurs été instrumentée avec deux objectifs :

→ Vérifier que pendant sa prise, la température à cœur du béton ne dépasse pas les seuils de températures explicités plus haut ;

→ Contrôler le vieillissement de la maquette, qui sera conservée dans le même environnement que les réservoirs.

La maquette a ainsi été pourvue de capteurs similaires à ceux implantés dans les réservoirs.

UN OUTIL COFFRANT SPÉCIFIQUE ET PERFORMANT

Le coffrage grim pant est apparu plus approprié que le coffrage glissant qui impose des effectifs importants sur de plus courtes périodes sans pour autant

6- Une formation dédiée à l'outil (maquette de formation à l'échelle 1).

6- Training dedicated to the facility (full-scale model).

pouvoir être valorisé en gain sur le chemin critique du projet global.

Dans un premier temps, il a été imaginé de partir sur un modèle de coffrage grim pant standard, mais il est vite apparu qu'un tel choix ne permettait ni un maintien de la continuité des circulations au droit des nervures, ni une ergonomie des postes de travail à la hauteur des ambitions du groupement. C'est donc un outil spécifique, pensé et réalisé en étroite collaboration avec les équipes de Simpra (spécialiste de la conception et de la fabrication d'équipements coffrants spécifiques) qui a été retenu, intégrant :

- Des accès et des circulations simples, évidents et sans obstructions ;
- Des passerelles suffisamment larges pour stocker matériels et outils ;
- Des escaliers en nombre suffisant (quatre intérieurs et quatre extérieurs assurent confort et sécurité d'accès en complément des ascenseurs de chantier) ;
- Des systèmes de guidage assurant une moindre dépendance au vent, particulièrement présent dans cette région.

L'utilisation de ce coffrage a donné pleinement satisfaction. Un rythme moyen d'une levée de voile tous les onze jours a pu être maintenu sur les levées courantes. Le gain de temps sur les tâches élémentaires, conjugué à l'amélioration des conditions de travail rend l'investissement intéressant.

L'ERGONOMIE AU CŒUR DU CHANTIER

Sur ce chantier relativement long et répétitif, l'ergonomie des postes de tra-

vail a été particulièrement poussée. Des formations spécifiques ont été organisées pour chaque poste de travail, un mode opératoire défini pour chaque tâche. Le choix d'outils spécifiques, de passerelles élargies et continues, d'escaliers en nombre a permis d'anticiper des améliorations sensibles qui se confirment après utilisation de l'outil : il y a moins de fatigue pour le personnel, moins de déplacements inutiles. De nombreuses suggestions d'amélioration ont été mises en application grâce à des ateliers de progrès impliquant l'ensemble des acteurs et organisés régulièrement sur les postes de travail (figure 6).

DES CHOIX CONSTRUCTIFS RESPECTUEUX DE L'ENVIRONNEMENT

→ Pour le génie civil, emploi de matériels dimensionnés et adaptations des dimensions des plots de bétonnage pour éviter d'avoir à travailler en 3 postes notamment pour les bétonnages ;
 → Adaptation de l'éclairage du chantier (notamment orientation des projecteurs vers le sol ; installation de projecteur PLS (faisceaux directifs - angle de diffusion moins large) à proximité des clôtures ; suppression des projecteurs sur les flèches de grues) ;
 → Études vis-à-vis du bruit généré par les travaux et mise en place de mesures dédiées (isolations phoniques au niveau des centrales à béton, encof-

frement des pompes utilisées pour les travaux d'amélioration de sol ; suivi acoustiques en période de nidification des sternes) ;

→ Plusieurs dispositions pour réduire les pollutions atmosphériques :

- Choix des fournisseurs à proximité du chantier,
- Couvertures des camions de granulats,
- Arrosage des pistes,
- Mise en place de grave compactée sur les voies principales de circulation de chantier ;

→ Réutilisation de l'eau recyclée pour la fabrication des bétons et pour le nettoyage des centrales à béton ;

→ Réutilisation des matériaux issus de l'ecofrog (nettoyage des bétons frais) en matières premières secondaires par un entrepreneur local ;

→ Choix d'un système de fondation à faible nuisance : pas de battage de pieux et utilisation d'un même outil pour faire en une seule opération le traitement de la couche profonde par

7- Maquette d'injection des câbles verticaux.

7- Jet grouting model for vertical cables.

colonne ballastée et de la couche superficielle par vibroflottation) ;

→ Utilisation de pointes filtrantes autour des réservoirs pour récupérer l'eau injectée lors des travaux de consolidation de sol, permettant de réduire les prélèvements d'eau dans le sol ;

→ Respect de la biodiversité (prévention des pollutions ; balisage des zones de nidification ; suivi écologique quotidien en période de nidification, travail prenant en compte les contraintes environnementales spécifiques au projet (nidification des sternes et grands gravelots...).

LA QUALITÉ DES TRAVAUX DE PRÉCONTRAINTE GARANTIE PAR LA MISE EN ŒUVRE DE MAQUETTES DÉDIÉES

Un projet exigeant:

→ Spécifications communes au socle génie civil d'EDF (Nucléaire et Réservoirs de Gaz) ;

→ Des procédures adaptées aux contraintes du projet ;

→ Maquettes partielles d'injection à l'échelle 1 ;

→ Critères physico-chimiques des matériaux et des remplissages identiques aux projets nucléaires.

De même que pour les activités de bétonnage, Dunkerque LNG a demandé la réalisation de maquettes pour les activités de précontrainte.

Ces maquettes, représentant les 2 types de câbles mis en œuvre sur le chantier (câbles horizontaux et verticaux respectivement en 19T15 et 12T15), ont consisté en la réalisation de gaines câblées, injectée et présentant les déviations maximales rencontrées sur l'ouvrage. L'intérêt de ces maquettes est de pouvoir contrôler de façon destructive la bonne réalisation des injections des gaines de précontrainte afin d'assurer la durabilité des câbles de précontrainte.

La qualité de réalisation ne pouvant être contrôlée à posteriori, la réalisation de ces maquettes comporte un intérêt évident (figure 7).

SÉQUENCE DE CONSTRUCTION

Les principales étapes de construction sont les suivantes :

→ Campagne de sécurisation pyrotechnique ;

→ Réalisation des travaux préliminaires suivant :

- Travaux d'amélioration de sol,
- Profilage de la plateforme,
- Réalisation d'un matelas de réparation d'une épaisseur de l'ordre de 2 m,
- Mise en place d'un double film de polyane,
- Coulage d'une couche de béton de propreté ;

→ Réalisation du radier de fondation (intégrant les tubes constitutifs du système de réchauffage de la dalle et de suivi des tassements) :

- Réalisation en priorité de l'anneau périphérique, de sorte à permettre un commencement au plus tôt des travaux sur les voiles,
- Le radier est réalisé en 15 plots : 4 plots annulaires extérieurs + 7 plots intérieurs qui sont séparés des 4 plots annulaires par un joint circulaire de 1,5 m clavé à la troisième levée du voile ;

→ Exécution des voiles béton :

- Réalisation en 10 levées successives de 3,72 m,
- Deux ouvertures temporaires sont maintenues en partie basse du voile, permettant l'acheminement des équipements nécessaires à la réalisation de la cuve interne ;

→ En préparation du levage à l'air du toit métallique :

- Pré-assemblage de secteurs du toit métallique à l'extérieur du réservoir,
- Installation et assemblage des dits secteurs à l'intérieur du réservoir (une fois la quatrième levée du voile coulée),



- Installation d'un anneau de compression dans la dernière levée du voile,
- Première phase de précontrainte (mise en tension des câbles de précontrainte en partie haute du voile) ;
- Opération de levage à l'air permettant de lever le toit et son plafond suspendu à sa position définitive :
 - Le mouvement est assuré par l'application d'une surpression nominale de 13 mbarg et assisté dans son déplacement par un système de câbles et poulies (qui évite que le toit ne se déplace en crabe),
 - Une fois en contact avec l'anneau de compression, le toit est claveté puis soudé à l'anneau de compression et la pression relâchée ;
- Exécution de l'épaulement (jonction voile/dôme) ;
- Réalisation du dôme :
 - Coulage d'une première couche d'une épaisseur de 15 cm sur la partie métallique du dôme qui fait office de coffrage perdu. La stabilité de la tôle est assurée pendant cette étape par une mise en pression de l'intérieur du réservoir (de l'ordre de 60 mbarg) jusqu'à l'obtention d'une résistance suffisante du béton,
 - Coulage de la seconde couche en plots dont le découpage est imposé par des considérations de talochage (sans mise en pression; les 15 cm de béton de première phase assurant la tenue mécanique) ;
- Deuxième phase de précontrainte (solde des câbles horizontaux et câbles verticaux),
- Exécution en parallèle :
 - Exécution des travaux intérieurs (cuve interne, épreuve pneumatique, isolation thermique, épreuve pneumatique, fermeture des ouvertures temporaires),
 - Réalisation des travaux extérieurs (structures, tuyauteries, isolation, E&I) ;
- Travaux de préparation à la mise en route :
 - Séchage, inertage,
 - Préparation à la mise en froid.

À noter que, dans le cadre du groupement, les activités suivantes ont été réalisées par Entrepouse Projets : liner en acier de la cuve externe, réservoir intérieur, isolation thermique, différents équipements internes et externes, levage du toit et travaux de préparation à la mise en route.

HYGIÈNE ET SÉCURITÉ : LE POINT D'EXCELLENCE DU DOMAINE PÉTROLE ET GAZ

Les Maîtres d'Ouvrage du domaine gazier imposent un niveau d'exigence en termes d'organisation et de procédures hygiène et sécurité sensiblement supérieur à celui des TP. D'une manière générale, les taux de fréquence d'accidents dans les TP sont encore loin des références de la profession dans le domaine pétrole et gaz.

Ce niveau d'exigence a ainsi été une opportunité pour progresser en termes de sécurité.

Parmi les requis HSE imposés par le contrat, les points suivants sont notables :

→ Tous les contractants et leurs sous-traitants doivent être titulaires d'une certification OHSAS 18001 : 2007, SCC 2000/03 ou MASE. Ils doivent aussi fonctionner selon les critères environnementaux de la norme ISO 14001 ;

→ La généralisation du système des permis de travail, habituellement utilisé sur des installations en exploitation pour les activités à risques et/ou en interfaces avec plusieurs intervenants ;

→ La définition pour chaque intervenant d'un nombre minimum de personnel HSE dédié en fonction du nombre d'ouvriers présents (1 superviseur HSE pour 50 personnes) ;

→ L'interdiction du recours à du personnel intérimaire pour des postes sensibles (conducteurs d'engin, conducteurs de grue...) sans accord préalable du Maître d'Ouvrage ;

→ La définition de standards HSE partagé par tous les intervenants sur

le projet avec un système de sanctions associées.

Et parallèlement à ce système bien établi et rigoureux, aucun aspect lié à la prévention n'a été omis avec notamment :

→ La promotion de l'ergonomie ;

→ La promotion des bonnes pratiques et la mise en place d'un Challenge Sécurité notamment par Dunkerque LNG à l'échelle du projet ;

→ Les échanges entre les HSE des différents intervenants pour mutualiser au maximum les expériences en termes de sécurité ;

→ La promotion des visites participatives de sécurité ou « Open Safety Dialogs » visant à sensibiliser de manière individuelle les intervenants et promouvoir la culture sécurité ;

→ Un travail avec les organismes (CARSAT, OPPBTP) sur des aspects spécifiques de la prévention (travail en milieu confiné, impact potentiel des envols de poussière et de sable sur le chantier en cas de grand vent par exemple).

ACTIONS MENÉES EN FAVEUR DES PERSONNES ÉLOIGNÉES DE L'EMPLOI ET EN FAVEUR DE L'EMPLOI LOCAL

Sur ce chantier dans une région fortement impactée par la crise, Bouygues TP a mis en place très rapide-

ment avant le démarrage des travaux, en collaboration avec l'association Entreprendre Ensemble, le Pôle Emploi, le GEIQ BTP, le CPO FC et Constructyts, un programme de recrutement et de formation longue permettant d'aboutir à l'embauche de plusieurs coffreurs-bancheurs sur le projet. Pour accompagner ces nouveaux collaborateurs, un programme de formation « professionnalisante », comprenant 700 heures en centre a été mis en place.

Les nouveaux embauchés ont ainsi pu suivre une formation en alternance pendant 15 mois et apprendre les bases techniques/comportementales/de sécurité pour occuper les fonctions de coffreur-bancheur sur le chantier. Pratiquement les actions menées se résument comme suit :

→ Plus de 200 personnes rencontrées en entretien de recrutement ;

PRINCIPALES QUANTITÉS

26 000 m² de sol traité sur environ 20 m de profondeur

52 000 m³ de béton

6 000 t de ferrailage

1 700 t de précontrainte

10 grues à tour

2 centrales à béton

3 jeux complets de coffrage girpant

8- Programme.

8- Schedule.

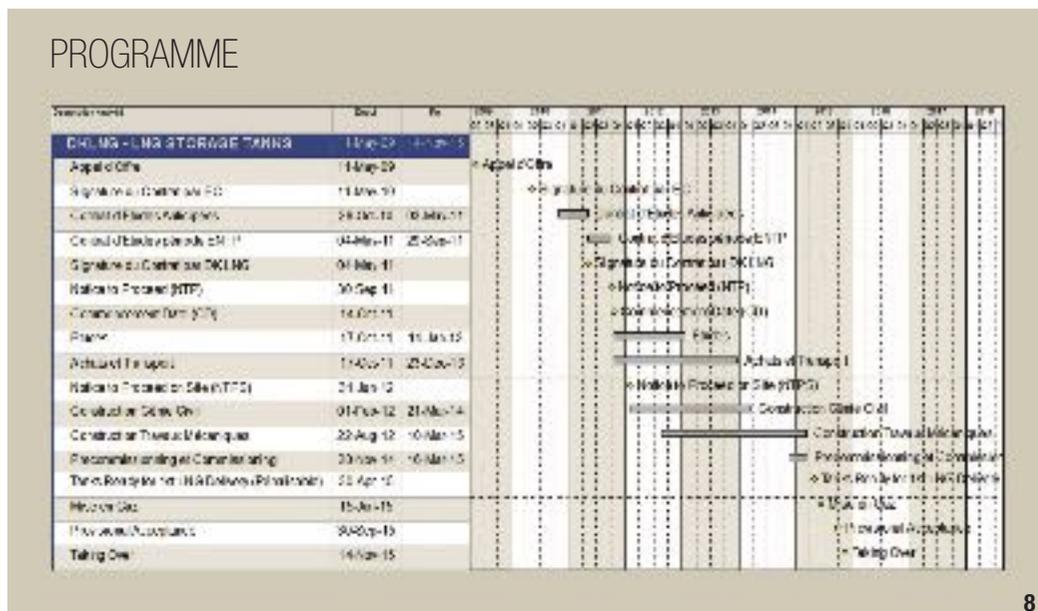


TABLEAU 1 : CONFIGURATION D'INSTRUMENTATION ADOPTÉE

Mécanisme de vieillissement	Phénomène physique surveillé	Instrumentation mise en place
Affaissement du réservoir	Basculement du réservoir	Pendules installés en parement
	Tassement absolu (d'ensemble) du réservoir	Repères de nivellement installés en parement
	Tassement différentiel périphérique du radier	Repères de nivellement installés en parement
	Tassement différentiel bord centre du radier	Tubes inclinométriques noyés dans le béton
	Rotation du pied de voile	Tiltomètres installés en parement
Pertes de précontrainte	Déformation verticale du voile béton (globale)	Fils invar installés en parement
	Déformation verticale du voile béton (locale)	Extensomètres à cordes vibrantes noyés dans le béton
	Déformation horizontale (tangentielle)	Extensomètres à cordes vibrantes noyés dans le béton
Pathologies du béton : • Réaction alkali-granulat • Réaction sulfatique interne Température du béton	Température du béton	Sondes de résistance de platine PT100 4 fils Classe A noyées dans le béton
	Teneur en eau libre à cœur béton	Sondes TDR noyées dans le béton
Corrosion des armatures	Pénétration et quantité des ions chlorures et autres agents agressifs (carbonatation)	Système sans fil (breveté par Bouygues Construction) noyés dans le béton

- 24 conventions de Préparation Opérationnelle à l'Emploi signées (POE - 2 mois) ;
- 21 contrats de professionnalisation (13 mois) signés ;
- 13 contrats CDI à durée de chantier signés ;
- 4 embauches définitives.

CONCEPTION DURABLE DES RESERVOIRS : INSTRUMENTATION DES ENCEINTES EXTERNES EN BETON

FINALITÉS

La conception et mise en œuvre de dispositifs de surveillance structurelle a été pensée de sorte à permettre au maître d'ouvrage :

- De juger de l'aptitude au service de l'enceinte externe sur la durée de vie

prévue de 50 ans, en s'assurant que celle-ci reste à tout moment dans les conditions nominales de fonctionnement (i.e. vision réaliste des ouvrages

au travers d'une carte d'identité informatisée actualisée) ;

- De suivre dans le temps l'évolution ou le maintien des paramètres permet-

tant de détecter les éventuelles modifications de comportement de l'ouvrage, et ainsi juger si ses installations peuvent être prolongés dans le temps ;

- De pouvoir justifier la prolongation de durée d'exploitation le cas échéant.

DISPOSITIONS DE SURVEILLANCE STRUCTURELLE

Pour apprécier le bon comportement du réservoir, il a été jugé nécessaire d'instrumenter les réservoirs comme indiqué dans le tableau 1.

Les quantités et implantations des instruments mentionnés dans le tableau 1 ont été établies en tenant compte :

- De la réalisation simultanée de 3 réservoirs ;
- Du retour d'expérience de ce type d'instruments ;
- De la disponibilité de maquettes réalisées sur le site du chantier qui resteront en place pendant la durée de l'exploitation ;
- De l'expérience des équipes de Bouygues TP et de son fournisseur Sites sur les systèmes de surveillance. □

CONTRIBUTEURS

Outre les personnes listées en première page, les personnes suivantes ont collaboré activement à l'établissement du présent article :

- Antoine AFETTOUCHE
- Brahim DJESSAS
- Anthony SCARAMOZZINO
- Rémi DUPUY
- Wassima MOUAYAD
- Noémie PRUVOST
- Maryline VERBAUWHEDE

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Dunkerque LNG SAS (EDF 65%, Fluxys 25%, Total 10%)

ASSISTANCE MAÎTRISE D'OUVRAGE : Cofiva (Ingénierie Thermique et Gazière d'EDF, 100%)

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Groupement Entrepose Projets - Bouygues TP

COORDINATION SPS : Apave

CONSORTIUM RÉSERVOIRS : Entrepose Projets - Bouygues TP

TRAITEMENT DE SOL : Soletanche Bachy Pieux (sous-traitant) et Terrasol (sous-traitant études)

PRÉCONTRAÎNTE : VSL (sous-traitant), filiale de Bouygues Construction

ABSTRACT

LNG TANKS FOR THE LNG TANKER TERMINAL AT DUNKIRK

PIERRE RENIER, EDF COFIVA - PHILIPPE VAILLANT, BOUYGUES TP - JÉRÔME THIERCAULT, BOUYGUES TP - LOUIS MARRACCI, BOUYGUES TP

Dunkerque LNG, a subsidiary of EDF, Fluxys and Total, awarded the Entrepose Projets/Bouygues TP consortium a contract for the construction of three liquefied natural gas (LNG) storage tanks on the site of the LNG tanker terminal at Dunkirk. The contract covers engineering, procurements, construction and commissioning tests. Each tank has a net capacity of 190,000 cu.m and measures 92 m in diameter, with a height of 50 m. These tanks will be the biggest tanks built in Europe. On this major construction site, special attention was paid to techniques, ergonomics and inspection, and to risk prevention and environmental protection. Models were produced to validate certain execution techniques and to act as durability samples. □

DEPÓSITOS GNL DE LA TERMINAL METANERA DE DUNKERQUE

PIERRE RENIER, EDF COFIVA - PHILIPPE VAILLANT, BOUYGUES TP - JÉRÔME THIERCAULT, BOUYGUES TP - LOUIS MARRACCI, BOUYGUES TP

Dunkerque LNG, filial de EDF, Fluxys y Total, ha confiado al consorcio Entrepose Projets - Bouygues TP la realización de 3 depósitos de almacenamiento de gas natural licuado (GNL) en el emplazamiento de la terminal metanera de Dunkerque. El contrato incluye la ingeniería, las compras, la construcción y los ensayos para la puesta en servicio. Cada depósito tiene una capacidad neta de 190.000 m³ y mide 92 metros de diámetro por 50 metros de alto. Estos depósitos serán los más grandes construidos en Europa. En esta obra de gran envergadura, se ha prestado una atención particular a los métodos, la ergonomía y los controles, así como a la atención y la protección ambiental. Se han elaborado maquetas para validar algunos métodos de ejecución, y que servirán como testigos de durabilidad. □

USAN : L'INSTALLATION D'UN CHAMP PÉTROLIER EN EAUX PROFONDES AU NIGÉRIA

AUTEURS : JACQUES MOLINA, DIRECTEUR DE PROJET, SAIPEM - STÉPHANE BERGER, CHEF DE PROJET, SAIPEM

EN MARS 2008, TOTAL E&P NIGERIA ATTRIBUE À SAIPEM LE CONTRAT POUR LA RÉALISATION DES ÉTUDES DE DÉTAIL, DES ACHATS, DE LA CONSTRUCTION ET DE L'INSTALLATION EN MER DES STRUCTURES ET CONDUITES SOUS-MARINES POUR LE DÉVELOPPEMENT DU CHAMP PÉTROLIER D'USAN, CHAMP EN GRANDE PROFONDEUR D'EAU AU LARGE DU NIGÉRIA. EN FÉVRIER 2012, LA PREMIÈRE GOUTTE DE PÉTROLE (« FIRST OIL ») COULE À BORD DES CUVES DE L'UNITÉ FLOTTANTE (FPSO), DÉSORMAIS RELIÉE AUX TÊTES DE PUIITS SOUS-MARINES À 800 M SOUS LA SURFACE.



1

© SAIPEM

LE CONTEXTE

Découvert en 2002, le champ pétrolier d'Usan est situé à plus de 100 km des côtes du Nigéria à des profondeurs d'eau comprises entre 750 et 800 m. Il est exploité par un consortium constitué initialement de Total, Esso, Chevron et Nexen et opéré par Total. Une fois la décision finale d'investissement prise, Total a lancé un processus d'appel d'offres pour l'attribution de quatre contrats principaux : la construction et le remorquage sur site du FPSO (figure 1) (l'unité flottante de traitement, stockage et export de la production), la fourniture des têtes de puits sous-marines, le contrat de forage des puits, et la partie du projet attribuée à Saipem :

le lot "UFR & OLT" (Umbilicals, Flowlines, Risers and Oil Loading Terminal), réseau de conduites rigides sous-marines et de liaisons fond-surface permettant de relier les têtes de puits au FPSO ainsi que la bouée de déchargement du FPSO vers des navires pétroliers de stockage et transport.

CONCEPT TECHNIQUE ET DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'architecture du champ sous-marin (figure 2) est constituée de :

→ **Piles** : pieux battus pour ancrer le FPSO lui autorisant une excursion de 50 m ; les 16 pieux de 30 m de hauteur et 5 m de diamètre sont connectés

1- Remorquage du FPSO Usan.

1- Towing the Usan FPSO.

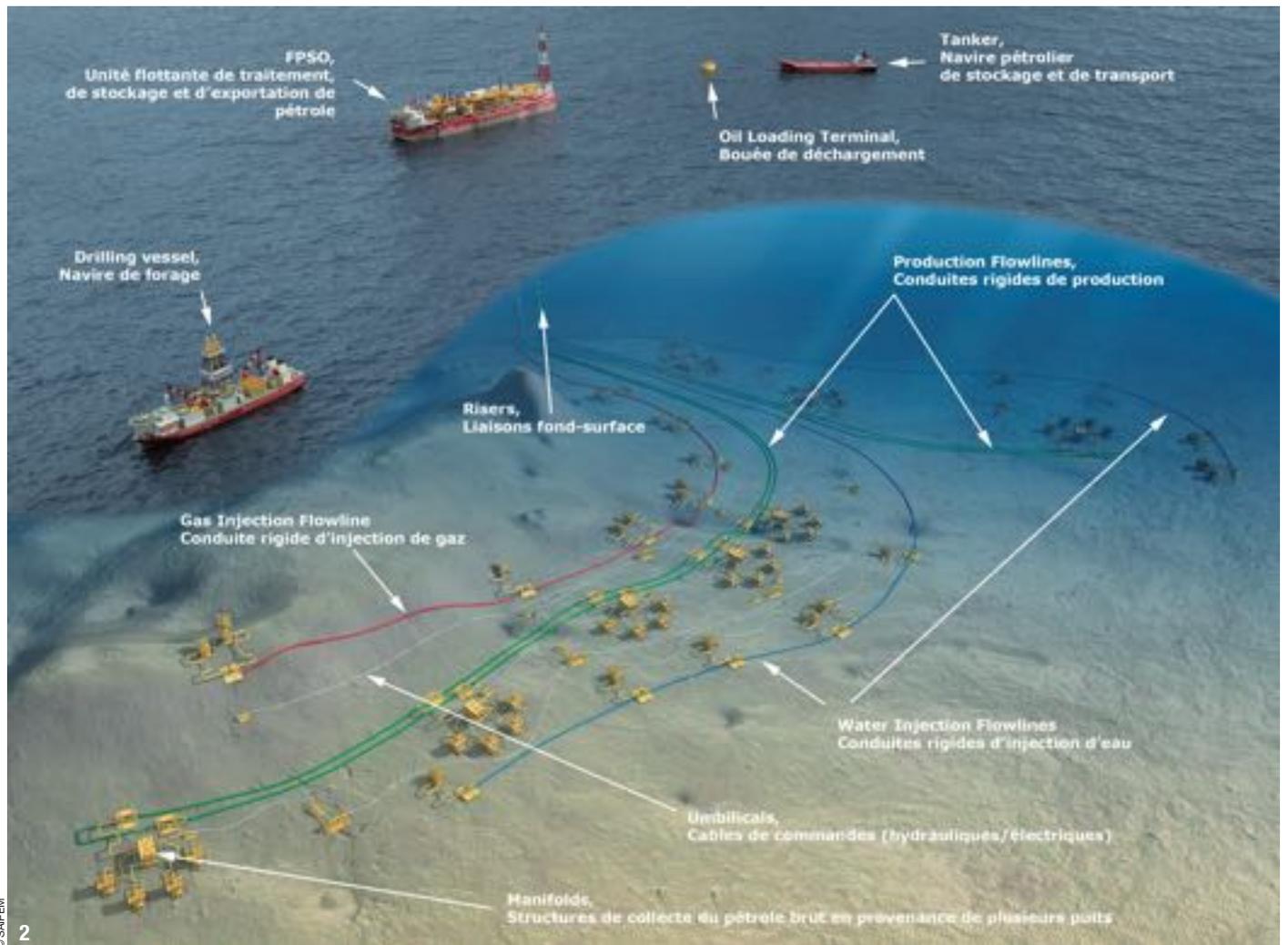
tées à des chaînes dont chaque maillon fait 147 mm de section ;

→ **Flowlines** : 67 km de conduites rigides installées sur le fond de l'océan reliant les manifolds - structures de collecte du pétrole en provenance de plusieurs puits de forage. Ces conduites récupèrent le pétrole brut (23 puits pro-

ducteurs), elles servent aussi à injecter de l'eau ou du gaz dans les puits sous-marins (19 puits injecteurs) ;

→ **Risers** : 7 liaisons fond-surface permettant de remonter le brut en surface, ancrées sur le fond au moyen de pieux et tendues grâce à des bouées en acier (figure 3) immergées à 150 m de profondeur d'eau et délivrant une poussée de 420 t ; ces risers sont reliés au FPSO par des conduites flexibles permettant de compenser l'excursion autorisée de celui-ci.

→ **Umbilicals** : 72 km de câbles de commandes (hydrauliques/électriques) des vannes sous-marines, déployés du FPSO jusqu'aux collecteurs sous-marins ;



© SAIPEM
2

→ Oil Offloading Lines (OOL) :

2 conduites rigides de 1500 m chacune reliant le FPSO à la bouée de déchargement (OLT, Oil Loading Terminal) ; elles permettent d'exporter le pétrole brut stocké temporairement dans les cuves du FPSO à des navires pétroliers de stockage et transport (« tankers »), au travers de la bouée à laquelle ces navires viennent s'amarrer de manière hebdomadaire. La particularité du système développé sur Usan est que ces conduites ont été étudiées pour pouvoir être déconnectées ; elles peuvent ainsi être installées indépendamment du FPSO ou de la bouée de déchargement.

Le contrat attribué à Saipem comprend les études de détail, les achats du matériel, la construction à terre et l'installation en mer de l'ensemble de ces structures sous-marines.

Saipem s'est appuyé sur son site permanent de fabrication de Port Harcourt et ses navires d'installation principaux Saipem 3000, FDS (Field Development Ship) et FDS2 (figure 4) ainsi que des navires d'assistance affrétés.

**2- Infographie 3D de l'architecture du champ USAN.
3- Bouées aciers des liaisons fond-surface.**

**2- 3D computer graphics of the architecture of the Usan field.
3- Steel buoys of seafloor-surface links.**

© SAIPEM



3

DÉVELOPPEMENT DU CONTENU LOCAL AU NIGÉRIA

Saipem a fortement développé l'investissement dans le contenu local au Nigéria lors du contrat Usan : dans les bureaux de projet situés à Lagos et Port Harcourt, 170 000 heures d'ingénierie de détail et de construction ont été réalisées ; de nouveaux investissements ont été entrepris sur le site de

Port Harcourt comme la construction d'un nouvel atelier couvert « Jumbo-workshop » (figure 5) de 64 m de largeur, double-allée, 230 m de long et d'une hauteur sous crochet de 7 m. Cette implication locale durable passe également par la participation au développement d'un réseau de fournisseurs et sous-traitants dans le tissu industriel de Port Harcourt et Lagos (entreprises de revêtement de tubes, fournisseurs d'anodes, sites de fabrications de structures secondaires) et par la formation de personnels de projet de nationalité nigériane et un accompagnement dans leur plan de développement professionnel.

CHALLENGES DU PROJET LE CRITÈRE TECHNOLOGIQUE

À ces grandes profondeurs, avec une eau à 4°C sur le fond de l'océan, le critère dimensionnant est le degré d'isolation thermique des lignes de production afin de garantir la température d'opération (entre 42°C et 79°C) et d'éviter que le pétrole ne se fige et n'obstrue la conduite.



4

© SAIPEM

À cet effet, notre client nous demande de réaliser un test de performance avant démarrage démontrant que, en cas d'arrêt de production, le temps de refroidissement des lignes soit plus long qu'une durée minimale définie au cahier des charges. L'isolation thermique des pipelines a été réalisée par une technique de « pipe-in-pipe » : la conduite de production est insérée à l'intérieur d'une conduite de plus gros diamètre ; le revêtement par un matériau isolant et le vide réalisé à l'intérieur de chacune des sections de 50 m (4 longueurs de tube de 12,5 m préassemblées à terre) assurent cette isolation.

L'INSTALLATION EN MER

Le « centre de gravité » du projet est la phase d'installation en mer. La principale campagne d'installation d'USAN a débuté en janvier 2011 et a duré plus d'un an, mobilisant les princi-

paux moyens navals d'installation de Saipem : le FDS, le FDS2 et la Saipem 3000. Ces trois navires permettent d'exécuter toutes les installations de structure ou pose de pipeline en grande profondeur. De longueur supérieure à 150 m, ces bateaux à positionnement dynamique peuvent accueillir chacun environ 200 personnes et sont dotés d'équipements de levage (grues et treuils) et de véhicules sous-marins télécommandés ROV (Remotely Operated Vehicle). Parmi les opérations complexes réalisées durant le projet Usan, on peut citer : le battage sous-marin de pieux de diamètre important, l'installation de connexions rigides de grande hauteur et l'opération de relevage de conduites en utilisant deux navires simultanément.

→ Un total de 25 pieux (figure 6) (16 pour l'ancrage du FPSO et 9 pour celui de la bouée de déchargement), d'un diamètre moyen de 5 m et de hauteurs variant entre 25 m et 37 m

4- Le FDS2, un des navires d'installation principaux de Saipem, avec en premier plan sa tour de pose de pipeline.

5- L'atelier couvert principal du site de fabrication de SCNL à Port Harcourt au Nigeria.

6- Pieux battus pour l'ancrage du FPSO.

4- The FDS2, one of Saipem's main installation vessels, with, in the foreground, its pipeline laying tower.

5- The main covered workshop on the SCNL manufacturing site at Port Harcourt, Nigeria.

6- Driven piles for anchoring the FPSO.

ont été fabriqués sur le site de SCNL à Port Harcourt, déployés dans 750 m de profondeur d'eau et battus au moyen d'un marteau hydraulique sous-marin de 110 t spécialement conçu pour cette tâche.

Les données géotechniques indiquant la présence de couches de sable à une profondeur de 11 à 14 m sous le sol marin ont conduit au choix d'un système de battage plutôt qu'une installation plus « classique » d'ancres à succion.

La contrainte principale de conception était de laisser la partie externe du sommet du pieu sans aucun élément protubérant, permettant ainsi au marteau de reposer sur ce sommet.

Le principe du battage hydraulique repose sur un piston accéléré qui se déplace à l'intérieur du corps du marteau jusqu'à venir frapper la tête du pieu pour lui permettre de s'enfoncer dans le sol marin. Dans le cas d'un



5



6

© SAIPEM

7- Saipem 3000, navire d'installation des pieux battus et ombilicaux.

8- Le marteau hydraulique pour battage de pieux, à bord de la Saipem 3000.

9- Connection rigide de bas de tour de riser et son palonnier.

10- Grue à chenilles 400 t pour le chargement des spools.

7- Saipem 3000, the installation vessel for driven piles and umbilicals.

8- The hydraulic hammer for pile driving, on board the Saipem 3000.

9- Rigid connection at bottom of riser tower and its lifting beam.

10- 400-tonne crawler crane for loading spools.



© SAIPEM 7

battage en grande profondeur d'eau, le système d'alimentation hydraulique doit également être sous-marin. Il est commandé par un câble électrique déployé depuis le navire d'installation en surface (en l'occurrence la Saipem 3000) (figure 7).

Le pont de 3 000 m² de la Saipem 3000 était à peine suffisant pour accueillir les 2 marteaux hydrauliques

équipés, leur treuil de déploiement et les 15 containers maritimes (cabine de contrôle, générateurs, compresseurs, pièces de rechanges, etc.).

Le projet Usan et la Saipem 3000 ont établi le record du plus grand diamètre (5 m) de pieux battus en eau profonde (figure 8).

→ Les connections rigides de bas de tour de risers (« spools ») (figure 9)

permettant de raccorder les risers aux flowlines ont atteint sur USAN des dimensions inhabituelles, la hauteur de certaines allant jusqu'à 25 m (l'équivalent de la hauteur d'un immeuble de 8 étages). L'étude de faisabilité d'installation a démontré la nécessité de la fabrication d'un nouveau palonnier dédié, de section triangulaire, et reposant sur deux assises verticales ; ▷



© SAIPEM 8



9



10

cette structure de 350 t d'acier a été fabriquée au Congo sur un site de fabrication appartenant à Saipem. Elle a ensuite été transportée par cargo-barge au Nigéria pour la campagne d'installation des 9 spools d'Usan. En parallèle, une grue à chenilles de capacité de levage de 400 t (figure 10) a été mobilisée spécifiquement pour les besoins du projet depuis l'Europe et ainsi permettre le chargement de ces spools sur les cargo-barges le long des quais du site de SCNL à Port Harcourt. → Le relevage des lignes de déchargement (OOL) était une opération complexe. Ces conduites rigides d'abord

pré-déployées sur le fond de l'océan à une profondeur de 800 m ont été ensuite relevées pour prendre leur configuration finale en chaînette à une hauteur d'eau entre 125 et 400 m de profondeur d'eau. Chacune des deux est relevée tour à tour depuis le sol marin jusqu'à sa position finale ; cette activité a nécessité la coordination précise de 2 navires principaux de Saipem (le FDS2 et la Saipem 3000) opérant en simultané et de 2 remorqueurs avec une puissance de tirage de 180 t chacun pour maintenir une tension horizontale dans la conduite lors de ce relevage (figure 11).

FACTEURS DE RÉUSSITE

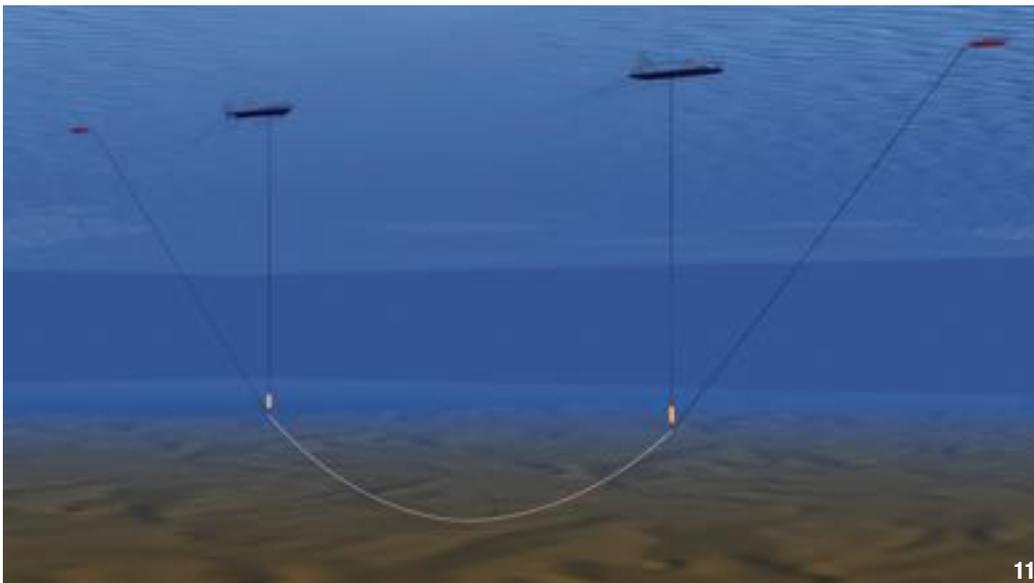
La réussite d'une telle entreprise réside dans une bonne gestion et organisation de projet, la productivité des opérations offshore et la gestion des risques :

→ Une planification et une anticipation des activités d'engineering, d'achats, de construction est indispensable pour ne jamais arrêter la productivité de nos navires d'installation qui doivent être « approvisionnés » en structures à installer sans discontinuité, 24 h sur 24, 7 jours sur 7.

→ La productivité de notre site de fabrication et de nos navires d'ins-

tallation en mer est cruciale. Elle est possible grâce à des équipes multiculturelles ayant l'habitude de travailler ensemble sur ces opérations.

→ Le dernier aspect-clé de la réussite d'un tel projet est le management des risques : l'identification des risques principaux, leur évaluation d'impact potentiel et l'analyse de leur probabilité d'occurrence très en amont dans la phase d'exécution du projet. Cet exercice est associé à la mise en place de plans d'action alternatifs anticipés pour le cas où l'un de ces risques identifiés surviendrait. Pour exemple, la panne mécanique sur l'arbre d'hélice



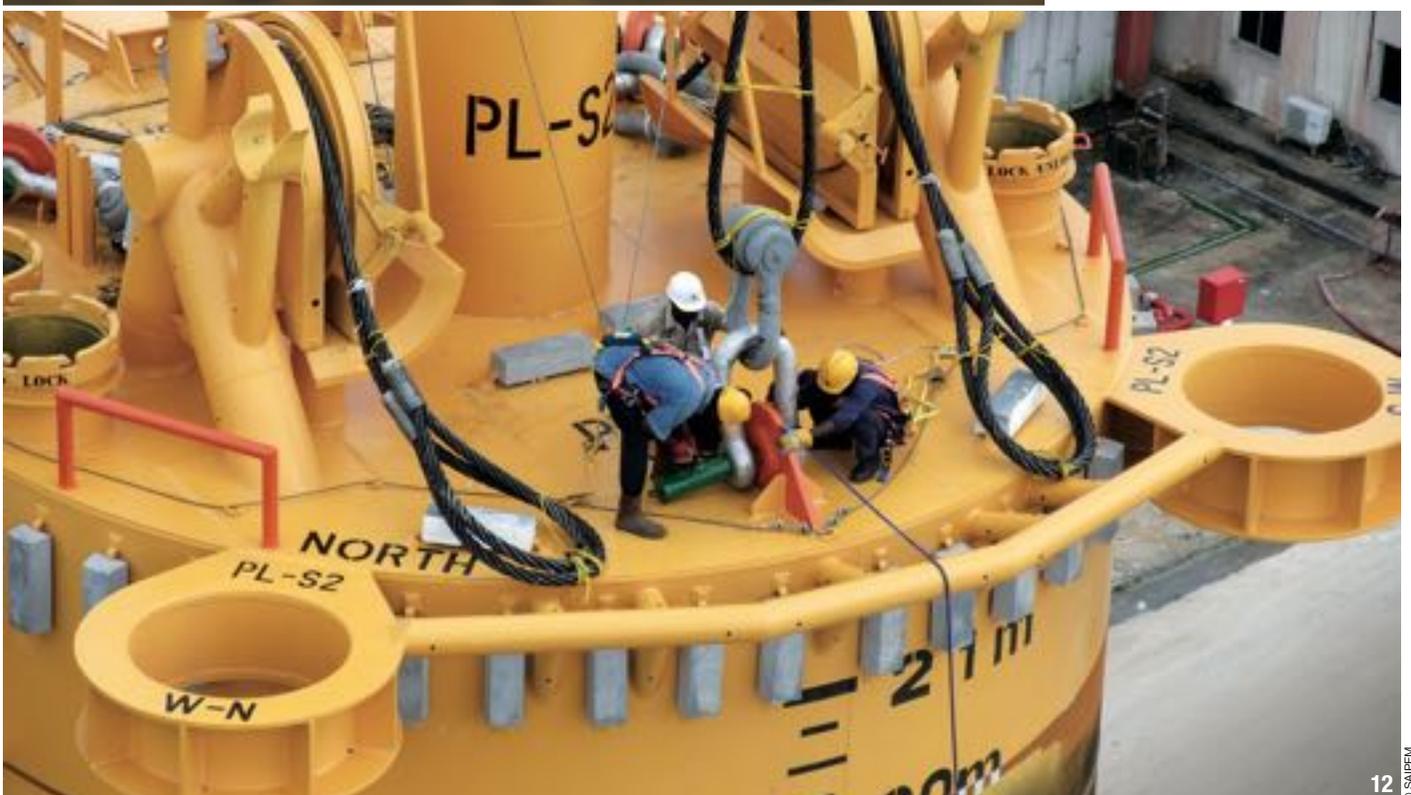
11

11- Infographie 3D de l'opération de relevage des OOLs, à 2 navires principaux d'installation et 2 remorqueurs.

12- Des travaux en hauteur à réaliser en sécurité.

11- 3D computer graphics of the OOL raising operation, with 2 main installation vessels and 2 tug boats.

12- Work at a height to be performed safely.



12

© SAIPEM



de l'un des plus « petits » bateaux (l'un des deux remorqueurs) constituant la flotte d'installation de l'opération de relevage des OOL a ainsi conduit à la nécessité d'arrêter l'opération, la panne ne pouvant être réparée en mer, ni dans un temps court. Si ce risque avait bien été identifié, les navires principaux d'installation ont cependant été réaffectés à d'autres travaux du projet ou démobolisés temporairement, le temps nécessaire pour faire

13- Retour au port sans accident pour la Saipem 3000 après 1 an passé sur le champ d'USAN.

13- Return to the port without a hiccup for the Saipem 3000 after one year spent on the Usan field.

venir le remorqueur de remplacement préalablement identifié dans le plan de secours et permettre ainsi de réaliser l'opération.

Le projet Usan totalise 10 millions d'heures travaillées sans accident (figure 12) ce qui permet de mesurer les progrès réalisés dans l'implémentation à tous les niveaux de l'entreprise d'une véritable « culture » de la prévention des risques humains et de la sécurité au travail.

Le programme innovant LIHS (« Leadership in Health and Safety ») développé par Saipem depuis 2008 a permis ce changement de mentalité et la diffusion de cette attention permanente et portée par tous de réaliser nos travaux en sécurité, sans prendre de « raccourcis » sur les mesures de prévention des risques identifiées dans nos procédures d'opérations et permettant ainsi d'éviter les accidents (figure 13). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LOT UFR ET OLT (ATTRIBUÉ À SAIPEM) :

26 000 t de structures fabriquées au Nigéria.

67 km de flowlines reliant 23 puits de production et 19 puits d'eau et de gaz.

72 km d'ombilicaux (pour la commande des vannes sous-marines).

25 lignes d'ancres dont 16 pour le FPSO et 9 pour la bouée de déchargement.

3 navires principaux d'installation pendant plus d'un an.

10 millions d'heures travaillées sans accident.

GLOSSAIRE

FPSO : Floating Production Storage and Offloading unit, unité flottante de traitement, stockage et export de la production.

OLT : Oil Loading Terminal, bouée de déchargement et d'amarrage des navires pétroliers de stockage et transport du brut.

OOL : Oil Offloading Lines, lignes d'export de pétrole brut.

Spool : Connection rigide entre deux parties de conduites.

ROV : Remotely Operated Vehicle, véhicule sous-marin filoguidé.

SCNL : Saipem Contracting Nigeria Ltd.

UFR : Umbilicals, Flowlines and Risers.

ABSTRACT

USAN: INSTALLATIONS FOR DEVELOPMENT OF A DEEPWATER OIL FIELD IN NIGERIA

SAIPEM : JACQUES MOLINA, STÉPHANE BERGER

In March 2008, TOTAL E&P Nigeria awarded Saipem a contract to perform detailed design engineering, procurement, construction and offshore installation of the underwater structures and pipes for development of the Usan oil field in very deep waters off the coasts of Nigeria. In February 2012, after a total of 10 million hours worked without a hiccup for Saipem, the first oil flowed into the tanks of the Floating Production, Storage and Offloading unit (FPSO). This floating unit is now connected to the undersea wellheads 800 m below the surface of the sea, by means of the underwater structures installed using Saipem's naval equipment. □

USAN: INSTALACIÓN DE UN CAMPO PETROLERO EN AGUAS PROFUNDAS EN NIGERIA

SAIPEM : JACQUES MOLINA, STÉPHANE BERGER

En marzo de 2008, TOTAL E&P Nigeria adjudicó a Saipem un contrato para la realización de los estudios de detalle, las compras, la construcción e instalación en mar de las estructuras y conductos submarinos para el desarrollo del campo petrolero de Usan, en aguas profundas a la altura de Nigeria. En febrero de 2012, y después de que Saipem registrara un total de 10 millones de horas trabajadas sin accidentes, la primera gota de petróleo ("first oil") fluyó a bordo de las cubas de la unidad flotante de tratamiento, almacenamiento y exportación de la producción (FPSO). Esta unidad flotante ya está conectada a las bocas de pozo submarinas, a 800 metros bajo la superficie del mar, a través de las estructuras submarinas instaladas por los medios navales de Saipem. □



© NICOLAS VERCELLINO

INVESTISSEMENT D'AVENIR ET PROUESSE TECHNIQUE LE RÉACTEUR DE RECHERCHE NUCLÉAIRE JULES HOROWITZ

AUTEURS : ÉRIC MERCIER, DIRECTEUR DE PROJET, RAZEL-BEC - FLORENT IMBERTY, DIRECTEUR TECHNIQUE, RAZEL-BEC - NICOLAS NAULET, DIRECTEUR DE TRAVAUX, RAZEL-BEC

OUVERT À LA COOPÉRATION INTERNATIONALE, LE RÉACTEUR DE RECHERCHE JULES HOROWITZ (RJH) EST L'OUTIL DONT SE DOTENT LE COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (CEA) ET SES PARTENAIRES EUROPÉENS POUR PRENDRE LA SUITE DU RÉACTEUR OSIRIS EN EXPLOITATION DEPUIS 1966. LE CEA, MAÎTRE D'OUVRAGE, ET AREVA, MAÎTRE D'ŒUVRE, PILOTENT LES TRAVAUX DE CE RÉACTEUR DE RECHERCHE, LE SEUL ACTUELLEMENT EN CONSTRUCTION EN EUROPE. RAZEL-BEC RÉALISE L'ENSEMBLE DU GÉNIE CIVIL DANS UN CONTEXTE DE CONTRÔLE TRÈS RIGOUREUX TANT DE LA PART DU CEA QUE DE L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE.



1



2



3

© NICOLAS VERCELLINO

En permettant l'étude du comportement des matériaux sous irradiation, RJH contribuera au développement de l'énergie nucléaire et en particulier à l'amélioration de la performance des réacteurs du futur en termes de sûreté, de production d'énergie et de durée de vie.

Par ailleurs, RJH sera l'un des principaux producteurs de radio-isotopes (Molybdènes 99) à usage médical.

Le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) est construit sur le site du CEA à Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône. Cette implantation s'inscrit naturellement dans la vocation du centre, plate-forme de recherche majeure pour l'énergie nucléaire en Europe. Ce centre de recherche dispose à la fois des infrastructures et des équipes de recherche, particulièrement renommées dans le domaine des combustibles et des réacteurs nucléaires.

1- Vue d'ensemble du projet Réacteur Jules Horowitz.

2- Densité de ferrailage de la piscine.

3- Vue d'ensemble du coffrage et ferrailage du voile extérieur cylindrique du bâtiment réacteur.

1- General view of the Jules Horowitz Reactor project.

2- Density of pool reinforcements.

3- General view of the formwork and reinforcing bars for the cylindrical outer shell of the reactor building.

UN PROJET INDUSTRIEL D'ENVERGURE

En marge de son expertise en matière de grands ouvrages d'art, Razel-Bec réalise des projets industriels complexes tels que stations d'épuration, centres de traitement des déchets ménagers et projets nucléaires.

Pour le groupement dont Razel-Bec est mandataire sur RJH, le marché comprend la réalisation de l'ensemble du génie civil des bâtiments et des installations en béton armé et précontraint,

ainsi que les lots techniques tels que charpentes et serrurerie, revêtements, portes et ascenseurs.

Le plus important des bâtiments par la taille est l'unité nucléaire (UN) composée du bâtiment réacteur (BUR) et du bâtiment des annexes nucléaires (BUA). Il s'agit d'un ouvrage de six niveaux renfermant le réacteur, logé dans sa piscine, ainsi que les canaux et la piscine d'entreposage des composants irradiés et les « cellules chaudes » de réalisation des expérimentations. ▷

QUI EST JULES HOROWITZ ?

Physicien français (1921-1995), ancien directeur des réacteurs nucléaires et de la recherche fondamentale du CEA, Jules Horowitz s'est spécialisé dans l'étude des réacteurs de recherche dès 1946. Ce physicien de renommée internationale est l'un des pères de la filière uranium-graphite-gaz. En 1962, il devient directeur des piles atomiques au sein du CEA.



4

© NICOLAS VERCELLINO

La construction de ce bâtiment nécessite 34 500 m³ de béton et 8 000 t d'acier.

Certaines phases de travaux comportent de gros bétonnages qui requièrent une organisation particulièrement poussée. En termes d'effectifs, le chantier a mobilisé jusqu'à 250 personnes en pointe. Sur ce type d'ouvrage, la coactivité est importante. Aussi, afin de tenir les délais et d'optimiser le temps d'utilisation des moyens de levage qui sont le moteur de l'activité, Razel-Bec a organisé un travail en postes 24 heures sur 24, du lundi 6h au samedi 13h.

UNE STRUCTURE D'EXCEPTION

RJH est l'une des premières unités nucléaires construites sur appuis parasismiques en France. Ces appuis, composés d'un bloc de néoprène fretté compris entre deux platines métalliques, isolent l'unité nucléaire du radier inférieur coulé sur le sol.

Ce système parasismique permet d'amortir le séisme et donc d'en limiter les conséquences sur le bâtiment et les équipements qu'il contient.

Le projet du RJH présente également un certain nombre de particularités constructives qui le distinguent des réacteurs nucléaires de production comme l'EPR. Signalons-en trois remarquables :

→ Les contraintes de radioprotection dues à la présence de personnel de recherche à l'intérieur du réacteur en exploitation ont nécessité l'emploi

de béton lourd structurel fortement ferrailé, alors que les centrales de production sont essentiellement réalisées en béton conventionnel ;

→ La présence des équipements de recherche conduit à noyer dans les voiles et planchers un grand nombre d'inserts avec des exigences de positionnement très strictes ;

4- Platines, inserts et consoles du pont polaire.

4- Plates, inserts and brackets of the polar crane.

→ La nécessité de pouvoir transférer des produits irradiés depuis le cœur du réacteur jusqu'à la zone d'analyse dans le BUA a conduit les concepteurs à solidariser structurellement le BUR et le BUA sous le niveau 0. La partie basse du BUR est n'est donc pas précontrainte dans la direction horizontale, sa résistance structurelle étant assurée par un ferrailage très important.

POSE DU DÔME MÉTALLIQUE DU RÉACTEUR RJH

Vendredi 13 décembre 2013, le CEA Cadarache, Areva et Razel-Bec ont procédé à l'opération de pose du dôme en acier sur le Réacteur Jules Horowitz. Le RJH a ainsi franchi une étape symbolique de sa construction avec l'obturation définitive de son bâtiment réacteur.

Cette opération d'exception a nécessité la mobilisation d'une puissante grue de 600 t de capacité, permettant de soulever les 115 t d'acier du dôme de 34 m de diamètre.

Ce « toit » en acier sert de coffrage perdu au dôme définitif du RJH en béton (85 cm d'épaisseur, 5 000 t), qui est en cours de réalisation depuis février dernier. Le toit d'acier a été construit avec un contrôle qualité et des tolérances dimensionnelles serrées par Secomoc (sous-traitant de Razel-Bec), entreprise des Bouches du Rhône qui est un spécialiste d'envergure internationale en chaudronnerie lourde et en réservoirs de grandes dimensions. La longueur cumulée des soudures dépasse 5 km.

C'est l'aboutissement de 8 mois de travail en atelier suivis 6 mois de chantier, soit environ 10 000 heures de travail de chaudronniers et de soudeurs spécialisés.

La délicate opération de pose aura nécessité 8 mois de préparation et la mobilisation d'une trentaine de collaborateurs du CEA, d'Areva, de Razel-Bec et de Secomoc (figures 5 à 9).

RETOUR SUR L'HISTOIRE D'UN CHANTIER HORS NORMES

Les travaux ont démarré en février 2009 avec la construction des cinq plots du radier inférieur. La centrale à béton dédiée, installée sur site, et l'apport de deux centrales extérieures ont permis le bétonnage de chaque plot en une seule opération. S'en est suivi la construction des poteaux parasismiques supportant les 195 appuis de néoprène frettés destinés à isoler l'unité nucléaire du radier inférieur.

L'année 2010 a vu la réalisation du radier supérieur de 1,50 m d'épaisseur, coulé en seulement deux opérations de l'ordre de 2 000 m³ chacune : la partie BUA en premier, puis la partie circulaire du BUR avec sa crypte suspendue en partie centrale.

En 2011 et 2012, l'unité nucléaire (constituée du bâtiment réacteur et du bâtiment des annexes nucléaires) a été élevée à partir du radier supérieur. Cette phase était particulièrement complexe du fait d'une forte activité combinée aux exigences de qualité requise.



© JÉRÔME CABANEL
5

Le gros œuvre intérieur du bâtiment réacteur a été achevé en 2013, année au cours de laquelle l'entreprise Joseph Paris, filiale du Groupe Fayat, est intervenue, suivant un phasage contraint, pour l'installation de la voie de roulement et du pont polaire sur les consoles métalliques déjà en place.

5 & 6- Pose du dôme en acier sur le réacteur Jules Horowitz.

5 & 6- Placing the steel dome on the Jules Horowitz reactor.

Enfin, l'année 2013 s'est terminée par la pose du dôme métallique de 115 t, coffrage perdu destiné à couler un dôme en béton précontraint qui viendra coiffer le bâtiment réacteur (voir encadré : Pose du dôme métallique du réacteur RJH). 2013 est aussi l'année de mise à disposition au client de

différents ouvrages pour l'intervention d'autres lots, en particulier les différentes piscines pour la mise en œuvre de leur cuvelage en acier inox.

UN PROJET SOUS HAUTE SURVEILLANCE

Le milieu nucléaire a des exigences techniques très fortes, en particulier vis-à-vis de la sûreté. Aussi, le CEA est-il placé sous le contrôle de l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Ce contrôle se décline auprès de tous les acteurs qui peuvent être inspectés, que ce soit le Maître d'Ouvrage, le Maître d'œuvre, les entreprises et leurs sous-traitants comme les fournisseurs.

À ce jour, près d'une vingtaine d'inspection se sont déroulées sur le site, mobilisant toute l'énergie de l'entreprise, inspections dont les rapports sont rendus publics.

C'est la garantie que le niveau de qualité de réalisation permettra l'exploitation de cette installation en toute sécurité.

Cela signifie, pour le Groupement dont Razel-Bec est mandataire, la mise en place d'une organisation pour répondre à ces exigences de qualité, mais aussi à celles liées à la sécurité des biens et des personnes ainsi qu'à la préservation de l'environnement. ▷



© JÉRÔME CABANEL
6



7
© JÉRÔME CABANEL

En matière de prévention des risques, c'est un phasage en perpétuelle évolution qui constitue la particularité de ce chantier. Arrêts, reprises, changements de mode opératoire, adaptations sont à mettre en œuvre régulièrement pour suivre les différentes évolutions du projet. Autre particularité, la gestion de la co-activité et ses deux corollaires : le travail en hauteur et la surveillance des ouvrages provisoires de seconde catégorie.

L'INNOVATION AU SERVICE DES EXIGENCES TECHNIQUES

L'une des principales difficultés de ce chantier réside dans le niveau d'exigence technique assigné à l'ouvrage qui, rappelons-le, est un prototype. Or, certaines exigences techniques sont parfois difficilement conciliables, ce qui conduit l'entreprise à faire preuve d'innovation.

Citons en exemple la piscine du réacteur, partie d'ouvrage qui renferme le cœur du réacteur. Dans cet ouvrage en béton armé extrêmement ferrillé, les densités peuvent dépasser les cinq cents kilos d'armatures par mètre cube de béton ! De plus, cet ouvrage doit assurer des fonctions de radioprotection et donc, à ce titre, il est réalisé en béton lourd.

La présence du ferrillage dense impose une vibration prolongée du béton, vibration mal supportée par le béton lourd sujet à la ségrégation.

Or la ségrégation conduirait, entre autres, à une variabilité de densité contraire à l'objectif recherché.

L'entreprise Razel-Bec a donc développé, en partenariat avec Unibéton, une formule de béton lourd auto-plaçant, qui constitue une première référence d'utilisation dans le domaine nucléaire.

Une année d'études en laboratoire et sur chantier a été nécessaire pour mettre au point une formule devant répondre à de nombreuses exigences là aussi difficilement conciliables : une densité élevée de 3,5 vis à vis de la radioprotection, une résistance mécanique de 40 MPa, une exothermie faible pour une mise en œuvre dans des ouvrages massifs de plus d'un mètre d'épaisseur et une fluidité la plus élevée possible pour une bonne mise en œuvre dans des ferrillages très denses. Ces études ont abouti à une formule de micro-béton utilisant la magnétite comme matériaux lourd.

Pas moins de 2 500 m³ de ce béton sont mis œuvre pour la construction des piscines et des cellules chaudes de l'Unité Nucléaire.

Un deuxième défi constructif a consisté à concilier ferrillage dense, réservations et inserts dans toutes les configurations.

Le RJH est un ouvrage complexe, alternant des formes circulaires et planes, du béton conventionnel et du béton lourd, des voiles épais et minces, des

7- Pose du dôme en acier sur le réacteur Jules Horowitz.

7- Placing the steel dome on the Jules Horowitz reactor.

structures de grande hauteur et des espaces exigus. Il a donc fallu mettre au point une méthodologie spécifique à chaque partie d'ouvrage pour obtenir le meilleur positionnement possible de tous les fourreaux, platines, inserts et réseaux d'étanchéité.

La collaboration entre les coffreurs de Razel-Bec et les armaturiers de Samt ont été la clé du succès de l'entreprise, tant au stade des études et méthodes, qu'au stade de la production. En effet, les exigences de positionnement des armatures et des différents inserts, combinés à la forte densité de ceux-ci, conduisaient à de nombreux conflits géométriques à anticiper au niveau des études et à maîtriser au cours de la réalisation.

AVANCEMENT DU CHANTIER

Le chantier du RJH est entré dans sa phase finale début 2014 avec 80 % du génie civil réalisés.

Coiffé de son dôme, le bâtiment réacteur a permis de commencer les tra-

voux de montage électromécanique à l'abri des intempéries : électrification du pont polaire, soudure des éléments de cuvelage.

Parallèlement, le béton du dôme est en cours pour la partie torique ; la partie sphérique mobilisera les équipes jusqu'à début 2015, avant que les phases de mise en précontrainte ne débutent.

Coté BUA, les travaux de réalisation des cellules chaudes sont en cours pour ce qui concerne le niveau 0. Le niveau +1 mobilisera le chantier jusqu'à la fin de l'année 2014.

Pour l'ensemble du bâtiment, de nombreuses salles sont mises en peinture, notamment le hall du BUR qui présente ainsi une configuration quasi définitive

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON DE STRUCTURE :
44 000 m³

COFFRAGES :
80 000 m²

ARMATURES HA :
9 000 t

PRÉCONTRAITE :
160 tonnes

APPUIS PARASISMIQUES :
195 unités



© JÉRÔME CABANEL

8

9

Les portes sont en cours de pose. Le chantier RJH est remarquable également par la jeunesse de l'encadrement. De jeunes conducteurs de travaux et de jeunes ingénieurs font leurs gammes sur ce chantier auprès d'anciens collaborateurs très expérimentés. Nul doute qu'un tel projet marquera l'histoire de l'entreprise. □

8 & 9- Pose du dôme en acier sur le réacteur Jules Horowitz.

8 & 9- Placing the steel dome on the Jules Horowitz reactor.

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

MAÎTRE D'ŒUVRE : Areva TA / EDF / Areva NP

POUR FAYAT : Razel-Bec mandataire, Joseph Paris et Comete Bilfinger Berger

ABSTRACT

INVESTMENT FOR THE FUTURE AND TECHNICAL PROWESS THE JULES HOROWITZ NUCLEAR RESEARCH REACTOR

RAZEL-BEC : ÉRIC MERCIER, FLORENT IMBERTY, NICOLAS NAULET

The Jules Horowitz research reactor (RJH), built at Cadarache, is the facility being acquired by the CEA (Atomic Energy Commission) and its European partners to follow on from the Osiris reactor. It is the only research reactor currently under construction in Europe. Razel-Bec is performing all the civil works in a context of very strict control by both the CEA and the Nuclear Safety Authority (ASN). For heavy concretes having to combine various rather incompatible properties, a special mix design was used for the first time in the nuclear industry. The steel dome 34 m in diameter serving as a permanent form is quite an exploit, as are the numerous inserts requiring great precision. □

INVERSIÓN DE FUTURO Y PROEZA TÉCNICA EL REACTOR DE INVESTIGACIÓN NUCLEAR JULES HOROWITZ

RAZEL-BEC : ÉRIC MERCIER, FLORENT IMBERTY, NICOLAS NAULET

El reactor de investigación Jules Horowitz (RJH), construido en Cadarache, es la herramienta de la que se han dotado el Comisariado de la Energía Atómica (CEA) y sus socios europeos para la continuación del reactor Osiris. Se trata del único reactor de investigación que se está construyendo actualmente en Europa. Razel-Bec se encarga del conjunto de la ingeniería civil en un contexto de control muy riguroso tanto por parte del CEA como de la Autoridad de Seguridad Nuclear. Dado que los hormigones pesados deben reunir diferentes características difícilmente conciliables, han sido objeto de una formulación específica utilizada por primera vez en la industria nuclear. La cúpula metálica de 34 metros de diámetro que sirve de encofrado perdido constituye una proeza, al igual que los numerosos insertos que requieren una gran precisión. □

CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES TABLEAUX BASSE TENSION DE LA CENTRALE EPR DE FLAMANVILLE

AUTEURS : ÉRIC BARBIER, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT TABELÉC, CLEMESY - VINCENT TSCHÉILLER, CHEF DE PROJET DU CONTRAT, CLEMESY

DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION DE LA CENTRALE DE NOUVELLE GÉNÉRATION, TABELÉC, LE DÉPARTEMENT CLEMESY SPÉCIALISÉ DANS LA CONSTRUCTION DE TABLEAUX ÉLECTRIQUES, RÉALISE CLÉS EN MAIN LES ÉQUIPEMENTS DE DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE BASSE TENSION : 49 TRANSFORMATEURS HT/BT ET 93 TABLEAUX DE DISTRIBUTION BT À CONCEVOIR, QUALIFIER, CONSTRUIRE ET INSTALLER SUR SITE. UN CONTRAT DONT LE RETOUR D'EXPÉRIENCE PERMET AUJOURD'HUI AU TABLEAUTIER DE VOIR BEAUCOUP PLUS GRAND.



© VIANNEY SAINTENOY PHOTOGRAPHE

LE PROJET EPR - FLAMANVILLE 3

Dès 2004, pour anticiper le renouvellement futur du parc nucléaire français, EDF souhaite construire une nouvelle centrale électronucléaire « Tête de série ». Conformément à la loi, EDF saisit la Commission Nationale du Débat Public qui décide d'organiser un

débat public sur le projet. En 2006, EDF, maître d'ouvrage, lance la construction de Flamanville 3.

Le réacteur EPR, dit de 3^e génération, est un Réacteur à Eau Pressurisée (REP) de 1 650 MWe conçu par Areva. La centrale (figure 1) dont la mise en service est fixée à 2016, répondra à une triple problématique : le coût de

l'énergie, la sécurité et l'impact environnemental. Ce chantier d'envergure placé sous hautes exigences de sécurité et de sûreté, a enregistré un grand retard sur le planning initial. Il n'en reste pas moins que le retour d'expérience d'un tel chantier est sans aucun doute formateur pour les entreprises y ayant participé.

TABELÉC

Tablelec est le département tableaux de Clemesly (Branche Énergie du groupe Eiffage). Situé à Mulhouse, l'atelier de 5 000 m² est totalement dédié à la conception et à la construction de Tableaux Généraux Basse Tension (TGBT), d'armoires et coffrets de distribution, d'automatisme ou de contrôle



1

© EDF MÉDIATHÈQUE - ALEXIS MORIN - ANTOINE SOUBIGOU, TOUS DROITS RÉSERVÉS

commande. Ces spécialistes sont à même de réaliser d'autres équipements spécifiques tels que des coffrets embarqués ou encore des faisceaux de câbles. Le département répond en direct aux appels d'offres du marché, de la conception à la mise en route. Il se positionne également comme sous-traitant interne pour les autres unités et filiales du groupe Clemessy.

Celles-ci font appel à Tabelec pour les accompagner sur leur marché. C'est ainsi que le département compte des réalisations dans de nombreux secteurs d'activité aux exigences spécifiques : nucléaire, énergie, spatial, défense nationale... pour lesquels il dispose des certifications et qualifications. C'est le cas notamment de la qualification UTO (Unité Technique Opérationnelle).

Cette qualification atteste que le site de production et les capacités de l'entreprise sont conformes aux exigences EDF.

LE CONTRAT LE PÉRIMÈTRE

En 2005, lorsque Tabelec décide de répondre à l'appel d'offres européen lancé par EDF pour la conception et la fabrication des équipements de distri-

bution électrique basse tension de la nouvelle centrale, le défi à relever est important. C'est la première fois que le tableautier s'intéresse à un projet clés en main de cette taille.

Le contrat comprend les études et la qualification, la production, l'installation, les essais et la mise en service des tableaux BT. Il intègre aussi la fourniture des transformateurs de sous-tirage permettant l'alimentation des différents tableaux électriques, la liaison électrique entre les transformateurs et les TGBT, la mise en place, ainsi que les essais de requalification de ces équipements. Les tableaux sont à tiroirs débrochables, indice de service (IS) 333, de Forme 4B (séparation physique des unités fonctionnelles entre elles, cloisonnement des jeux de barres et des bornes de raccordement, séparation physique du raccordement des câbles entre eux). Ils alimentent l'ensemble des moteurs ou actionneurs nécessaires au fonctionnement de la centrale nucléaire et assurent la distribution des tensions 690 et 400 Volt alternatif et 220 Volt continu. C'est la société ABB, sous-traitant déclaré, qui assure la conception et la fourniture des transformateurs HT/BT. Ces derniers ont un rapport de transformation de 20 kV/690 V ou 400 V et une puissance de 5 000 à 160 kVA. Chaque transformateur est intégré dans une « cabine ». Les transformateurs et les cabines sont soudés sur des supports spécifiques qui sont solidaires de la dalle béton des locaux électriques. ▷

1- Vue aérienne de la future centrale EPR 3.
2- Le système Multi-Drawer permet l'adjonction ou la suppression, sous tension, de tous types et tailles de tiroirs en toute sécurité pour l'intervenant.

1- Aerial view of the future EPR 3 power plant.
2- The Multi-Drawer system makes it possible to add or remove, live, all types and sizes of drawers in complete safety for the operator.



© CLEMESSY

2



3
© CLEMESSY



4 © CLEMESSY

LES TABLEAUX DÉBROCHABLES

Depuis de longues années, Tabelec est partenaire de la société danoise Cubic qui a développé un concept de tableaux à tiroirs débrochables modulaires. Cette solution offre les avantages du libre choix de l'appareillage électrique intégré et permet au tableau de rester libre dans sa conception.

Ce partenariat se traduit par un travail collaboratif avec le département R&D de Cubic qui permet de faire évoluer et qualifier les solutions.

C'est ainsi que dans le cadre de ce contrat, il a été validé que la nouvelle génération de tiroirs débrochables de type « Multi Drawer » serait déployée sur ce projet.

Cette solution novatrice et brevetée apporte une réponse aux fortes

contraintes de délai et de continuité de service, notamment en cas de besoin de reconfiguration du tableau sous tension. Le système Multi Drawer permet l'adjonction ou la suppression, sous tension, de tous types et tailles de tiroirs en toute sécurité pour l'intervenant (figure 2). Les évolutions des réserves dans le temps sont libres, limitant l'investissement au juste nécessaire en gardant intacte la capacité à faire vivre l'installation.

Il permet aussi la combinaison, dans la même colonne, de toutes les tailles de tiroirs avec des appareils de fortes puissances sur châssis débrochables, des appareils fixes, des compartiments auxiliaires et de mesures. Il répond particulièrement aux exigences des secteurs d'activité où une interruption

de l'alimentation électrique peut être dangereuse sur le plan humain ou extrêmement dommageable d'un point de vue économique (figure 3 et 4).

DEUX ANNÉES D'ÉTUDES ET DE QUALIFICATION

La commande est remportée fin 2006 et la réunion d'enclenchement a lieu en février 2007. Pour produire dans les meilleures conditions et garantir le respect des échéances, Tabelec met en place une organisation dédiée au contrat et renforce ses effectifs.

Le département fait appel aux différentes expertises du groupe qui apportent leur savoir-faire dès la phase de conception.

C'est le cas par exemple pour les vérifications mécaniques et tests de fiabilité

3- Le dispositif de verrouillage garantit qu'un tiroir ne peut être retiré et inséré qu'après sectionnement de son circuit principal. La thermographie, le réglage des déclencheurs ainsi que l'inspection visuelle sont réalisables en fonctionnement.

4- Un dispositif spécifique a été conçu pour empêcher l'introduction d'un tiroir dans un emplacement du tableau pour lequel il n'est pas prévu.

5- Les essais exploratoires aux séismes des tableaux.

3- The interlocking device ensures that a module can only be removed or inserted after disconnecting its main circuit. Thermal imaging, tripping device adjustments and visual inspection can be performed during operation.

4- A special device has been designed to prevent the insertion of a drawer in a switchboard slot for which it is not planned.

5- Exploratory switchboard seismic tests.



5
© CLEMESSY

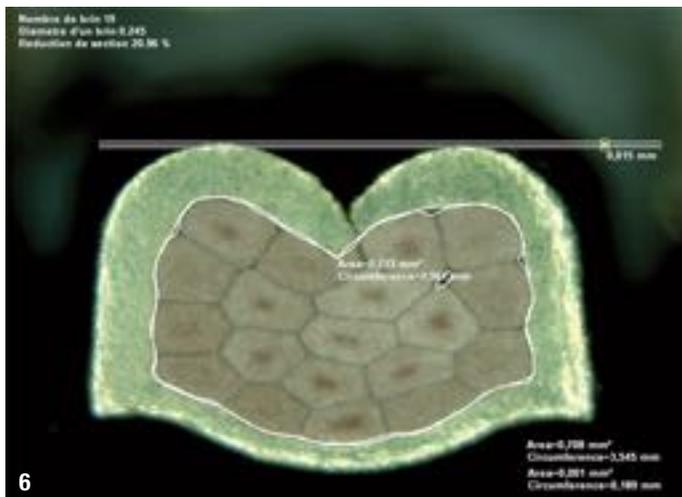
indispensables aux justifications exigées par l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Le département Aéronautique & Spatial a quant à lui apporté son savoir-faire en matière d'études de sûreté.

ÉTUDES DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

La sûreté de fonctionnement (SDF) a pour objectif de qualifier, de quantifier et d'optimiser la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'un équipement ou système. Elle permet de valider la conception d'un système en identifiant toutes les sources de défaillance possibles et les conséquences sur son fonctionnement ainsi que sur la sécurité des personnes et des biens.

Dans le cadre du contrat EPR, la première étape a consisté à réaliser l'analyse fonctionnelle de chaque tableau électrique pour en décrire l'architecture, les liens fonctionnels entre les différents éléments et les comportements possibles. Ce diagramme fonctionnel a permis de modéliser chaque tableau électrique dans son fonctionnement attendu et les pannes susceptibles de se produire.

Tous les composants ont été analysés et classifiés selon leur criticité (fonction principale/fonction secondaire). Pour chacun d'entre eux, on a recherché son temps moyen entre deux pannes (MTBF : Mean Time Between Failures). Celui-ci est obtenu auprès du fabricant, par norme ou par retour d'expérience. Ces valeurs individuelles ont permis de calculer le MTBF global de chaque tableau électrique et d'identifier les composants qui pèsent le plus sur le taux de défaillance. Le MTBF



© CLEMESSY

6- Contrôle du taux de remplissage des cosses.

7- Au total, 715 m de tableaux seront fabriqués dans les ateliers mulhousiens.

8- Au plus fort de la production, la gestion de stock en flux tendus est mise en place.

6- Check on the terminal filling rate.

7- In all, 715 metres of switchboard will be manufactured in the Mulhouse workshops.

8- At peak production, just-in-time stock management is introduced.

s'exprime en nombre d'heures et doit correspondre à l'exigence du client. Il garantit la fiabilité et la robustesse dans le temps des systèmes livrés.

La démarche peut également être complétée d'une analyse de modes de défaillances ou d'arbres de causes qui mettraient en évidence les scénarios de dysfonctionnement susceptibles d'entraîner l'apparition d'un fonctionnement ou d'une conséquence indésirable, qui sont des événements redoutés.

Cette analyse permet de revoir la conception et de garantir l'atteinte des objectifs de fiabilité fixés. Cela se traduit, soit par le changement des composants dont le MTBF serait pénalisant, soit par la mise en redondance des composants d'une même fonction, soit par l'émission de recommandations de maintenance, à savoir des contrôles de fonctionnement périodiques ou l'échange anticipé de composants fragiles.

Les études de sûreté de fonctionnement ont accompagné l'ensemble de la phase de conception des tableaux électriques ainsi que l'ensemble des modifications apportées tout au long du projet.

FIL D'ESSAIS

En 2008, le premier prototype est disponible et les essais peuvent démarrer. Les exigences d'EDF sont renforcées et de nouvelles qualifications sont introduites. Deux années seront nécessaires pour réaliser l'ensemble des essais exploratoires de qualification.

Pour mener à bien ces essais, Tabelec va s'appuyer sur les plus grands laboratoires français et européens. Le vaste panel d'essais (on parle de « fil d'essais ») nécessitera une logistique impressionnante et les prototypes parcourront près de 8600 km à travers l'Europe !

Les essais exploratoires aux séismes des tableaux ont été réalisés en Suède, alors que les essais de qualification ont été faits en Espagne (figure 5).

Les transformateurs ont été testés en Allemagne, dans le seul laboratoire capable d'accueillir des équipements d'un poids de 9 t. Les essais de tenue aux courts-circuits sur les tableaux ont été réalisés en Alsace.

Les contrôles du taux de remplissage des cosses ont été faits en Franche-Comté. Ils permettent de s'assurer que le fil rempli entièrement le fût de la cosse et qu'aucun vide ne subsiste, au risque de provoquer un point d'échauffement (figure 6).

Les essais électriques des appareils de coupure (post-essais sismiques) ont été réalisés en Italie. ▷



7 © STUDIO CHLOROPHYLLE



8 © CLEMESSY



FIGURE 9 © CLEMESSY - FIGURES 10, 11 & 12 © EDF MEDIATHÈQUE - ALEXIS MORIN - ANTOINE SOUBIGOU, TOUS DROITS RÉSERVÉS

Les essais de tenue en température et en charge ont été réalisés à Paris. Enfin, les essais à la compatibilité électromagnétique (CEM) qui permettent de vérifier si le tableau est récepteur ou émetteur d'ondes qui risqueraient de perturber son fonctionnement ou son environnement, ont été réalisés en région Rhône-Alpes.

PRODUCTION
UNE ORGANISATION REPENSÉE : INDUSTRIALISATION DU PROCESSUS DE FABRICATION

Un atelier de 1 500 m² est totalement dédié à la fabrication des armoires et une équipe spécifique « câblage nucléaire » a en charge la fabrication des armoires classées AIP (Activité Importante pour la Protection des Intégrités).

Cette classification entraîne un suivi rigoureux des tâches accomplies par les monteurs durant la fabrication. Chaque opération de fabrication doit être enregistrée ainsi que l'opération de contrôles associés.

Ainsi, les temps de montage et de raccordement des appareils sont équivalents aux temps nécessaires à la tenue à jour des documents de traçabilité des opérations.

Des gammes de montage sont mises en place pour assurer la fabrication des 93 tableaux, soit 715 m linéaires ! Pour gérer le flux de production de son atelier, Tabelec a créé une zone de « stockage tampon » à proximité de la future centrale. Au fur et à mesure que les tableaux sont produits dans son atelier mulhousien, Tabelec expédie les tableaux par camion. Au total, 80 semi-remorques réaliseront le trajet Mulhouse-Flamanville (figures 7 et 8). Au plus fort de la production, 80 personnes sont mobilisées dans l'atelier pour le câblage des armoires et 8 personnes affectées au contrôle fonctionnel des équipements.

Pour faire face à son carnet de commandes, Tabelec doit louer un atelier à proximité de Mulhouse pour assurer

la production des autres contrats en cours. C'est le cas notamment pour la fabrication des TGBT, armoires d'automatisme et de contrôle-commande ainsi que les tableaux de distribution du projet « DOM » (Construction des nouvelles centrales thermiques en Guadeloupe, Martinique et Île de la Réunion dont EDF Production Insulaire est maître d'ouvrage).

L'INSTALLATION ET LES ESSAIS SUR SITE

Le premier tableau est livré sur site en 2010. Sa mise en place est spectaculaire puisqu'il doit passer par le sommet du bâtiment réacteur à 28 m de hauteur. Une grue spécifique est indispensable pour opérer les manœuvres nécessaires.

TABLEAUX CUBIC

Tabelec vient d'obtenir le certificat KEMA Keur pour les tableaux Cubic. Ce certificat lui permet d'être reconnu "constructeur d'origine" du système au vu de la nouvelle norme tableaux CEI 61439-2. Cette certification, reconnue à l'international, a été réalisée par le département R&D de Cubic et par le bureau certificateur Dekra en Hollande.

9- Tableaux en cours de raccordement à la centrale.

10- Modifications sur un tableau BT qui alimentera différents matériels de l'îlot nucléaire.

11- Essais des tiroirs avec le banc d'essais mobile développé.

12- Essais de requalification des tableaux. Grâce au banc d'essais, toutes les fonctionnalités sont testées.

9- Switchboards being connected to the power plant.

10- Changes on an LV switchboard that will power various items of equipment in the nuclear island.

11- Drawer tests with the mobile test bench developed.

12- Switchboard requalification tests. Using the test bench, all functionalities are tested.

13- Tabelec accueille chaque année de nombreux jeunes en contrat d'alternance. La capitalisation des retours d'expérience du contrat EPR a permis de mettre un place un module de formation « méthodologie câblage » dispensé à l'Institut Des Métiers, l'école de formation du groupe Clemessy.

13- Each year Tabelec receives numerous youths on work-study contracts. By capitalising on post-project analysis of the EPR contract, a "cabling methodology" training module has been set up. Training is provided by the Clemessy Group's training school, Institut Des Métiers.



© CHLOROPHYLLE

13

Une manutention sous haute sécurité quand on sait que le transformateur pèse pas moins de 9 t et que sur le chantier évoluent plus de 3000 personnes.

L'installation sur site a nécessité de nouvelles adaptations sur les tableaux (figures 9 et 10). Au regard du génie civil, les systèmes de fixation des tableaux au sol ont dû être totalement repensés.

Pour réaliser les essais en atelier et sur site, Tabelec a développé des moyens spécifiques.

Des bancs d'essais mobiles (figure 11) ont ainsi été conçus et développés par les équipes afin d'automatiser les tâches.

C'est le cas notamment pour tester le fonctionnement des tiroirs. L'édition d'un rapport de conformité est imprimée de façon automatique.

À ce jour, 93% des équipements sont installés sur le site et les essais sont avancés à hauteur de 50% (figure 12). Les équipes de Tabelec ont relevé les défis d'organisation de ce contrat et les hautes exigences de sécurité et de fiabilité des équipements livrés. La capitalisation des retours d'expérience, tant sur le plan technologique qu'organisationnel, lui a permis de remporter en 2013, le contrat de remplacement des tableaux de distribution (dits tableaux sources) de 9 centrales nucléaires (figure 13). □

CHIFFRES CLÉS

- **110** tableaux construits, dont 8 prototypes.
- **743** colonnes.
- Poids moyen d'une colonne équipée : **1100** kg.
- Environ **1000** vis ou boulons par colonne.
- Temps moyen de câblage sur 1 colonne : **400 à 500** heures.
- **8** points de fixation au sol par colonne.
- **6 314** tiroirs.
- **715** mètres linéaires de tableaux.
- **310** km de fils.
- Poids de cuivre utilisé dans la conception des jeux de barres : **23** km, soit **100** t.

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF LOW-VOLTAGE SWITCHBOARDS FOR THE FLAMANVILLE EPR POWER PLANT

ÉRIC BARBIER, CLEMESSEY - VINCENT TSCHILLER, CLEMESSEY

At the end of 2006, Tabelec, the department of Clemessy specialised in the construction of electrical switchboards, won the turnkey contract for the low-voltage electricity distribution equipment of the new Flamanville EPR power plant. The contract is subject to high security and safety requirements, and the switchboard supplier must design, qualify, build and install on site 93 LV electrical distribution switchboards and 49 HV/LV transformers. □

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CUADROS DE BAJA TENSÓN DE LA CENTRAL EPR DE FLAMANVILLE

ÉRIC BARBIER, CLEMESSEY - VINCENT TSCHILLER, CLEMESSEY

A finales de 2006, Tabelec, el departamento Clemessy especializado en la construcción de cuadros eléctricos, obtuvo el contrato llave en mano de los equipos de distribución eléctrica de baja tensión de la nueva central EPR de Flamanville. Un contrato con altas exigencias de seguridad y protección, por el que el proveedor de cuadros debe concebir, cualificar, construir e instalar en el emplazamiento 93 cuadros de distribución de BT y 49 transformadores AT/BT. □



1- Vagues de grande marée sur la digue d'Esquibien - Finistère.

1- Waves at high tide on the Esquibien breakwater, Finistère.

1

© ARZEL

RÉCUPÉRATION DES ÉNERGIES MARINES PAR DISPOSITIFS HOULOMOTEURS : UN VOILE DU PROJET NATIONAL EMACOP

AUTEURS : PHILIPPE SERGENT, DIRECTION TECHNIQUE EAU, MER ET FLEUVES, CEREMA - ALAIN CLÉMENT, PROFESSEUR, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES - VIRGINIE BAUDRY, CHARGÉE DE RECHERCHE, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

LE PROJET NATIONAL EMACOP VISE LA RÉCUPÉRATION DES ÉNERGIES MARINES EN ZONE CÔTIÈRE ET PORTUAIRE. CES ÉNERGIES SONT RÉCUPÉRÉES À TRAVERS DES USINES MARÉMOTRICES, DES POMPES À CHALEUR À EAU DE MER, DES HYDROLIENNES OU DES DISPOSITIFS FONCTIONNANT AVEC LA HOULE. PARMIS CES TECHNOLOGIES, C'EST LA RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE DE LA HOULE AU BORD DES QUAIS QUI EST LE PLUS ÉTROITEMENT LIÉE AU DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES. L'ADAPTATION DES OUVRAGES CÔTIERS VIEILLISSANTS EST UNE OPPORTUNITÉ POUR INTÉGRER DES SYSTÈMES DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE.

INTRODUCTION

Les ouvrages côtiers le long des côtes françaises ou européennes sont souvent vieillissants et rencontrent des problèmes de stabilité. Le changement climatique et la remontée du niveau moyen de la mer les exposent à des sollicitations non prévues. Ces structures doivent donc être modernisées et adaptées d'une part au changement climatique et d'autre part à l'évolution des activités maritimes comme l'arrivée des grands porte-conteneurs. Cette adaptation peut être coûteuse mais peut constituer une opportunité pour intégrer des systèmes de récupération

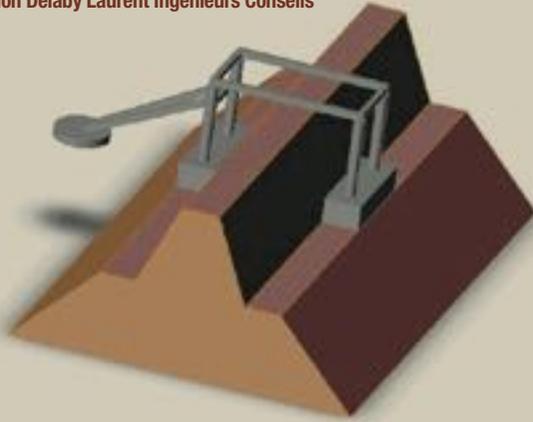
LE PROJET NATIONAL EMACOP

Le Projet National « Énergies Marines Côtiers et Portuaires » EMACOP rassemble, sur la base d'un engagement volontaire, 28 partenaires (Artelia Eau & Environnement, Bouygues TP, Casagec Ingénierie, CDC Pointe du Médoc, Centrale Innovation, Cete Ouest, Cetmef, Conseil Général du Finistère, Conseil Général Pyrénées Atlantique, Dcns, Egis, Egsi, Emcc, Énergie de la Lune, Fnpt, France Énergies Marines, Globocéan, Gpmh, Hydrocap Energy, IC Ingénieurs Conseils, Ifremer, Ifsttar, Isl Ingénierie, Lusac, Open Ocean, Parlier Environnement, Uih, Uppa, Utc). Il est soutenu par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et est administré par l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil). Le P.N. EMACOP est programmé sur une durée de 4 ans à partir de février 2012.

de l'énergie de la houle dans les nouvelles structures maritimes le long des côtes et en particulier dans les ports. Le Projet National Energies Marines Côtiers et Portuaires : EMACOP (www.emacop.fr), vise à étudier la pertinence en termes de coût financier et coût énergie de telles associations digue - dispositifs houlomoteurs. Cette initiative contribuera à la réduction de l'effet de serre. L'énergie produite peut être utilisée directement pour la consommation d'énergie de la zone portuaire et réduira l'empreinte carbone des ports. Elle peut être en particulier utilisée pour alimenter les navires à quai en énergie verte.

BRAS OSCILLANT MU PAR UN FLOTTEUR

selon Delaby Laurent Ingénieurs Conseils

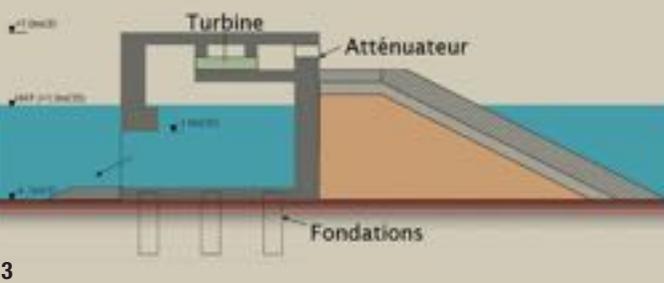


2

© DELABY LAURENT INGÉNIEURS CONSEILS

COLONNE D'EAU OSCILLANTE

selon Voith Hydro Wavegen

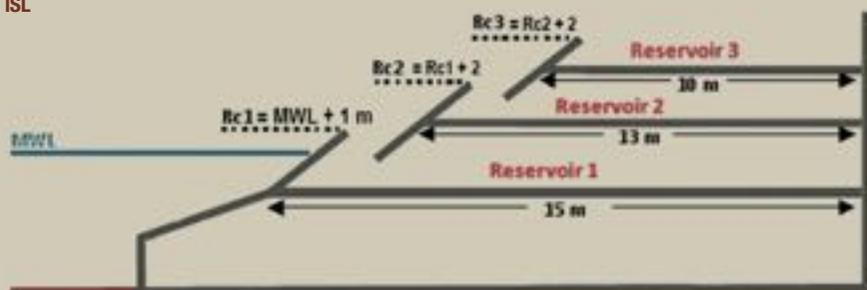


3

© VOITH HYDRO WAVEGEN

SYSTÈMES À FRANCHISSEMENTS AVEC TROIS RÉSERVOIRS

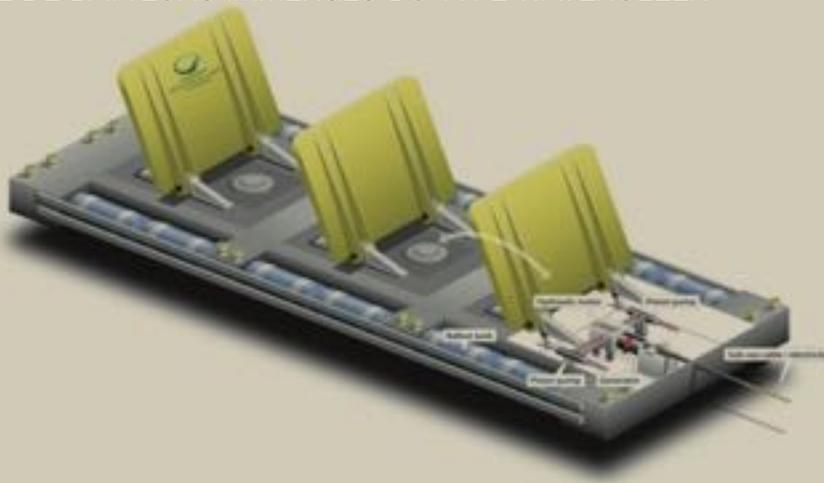
selon ISL



4

© ISL

FERME DE BATTEURS IMMERGÉS DU TYPE WAVEROLLER



5

© AW ENERGY

Actuellement ces navires utilisent leurs moteurs pour produire de l'énergie électrique même à quai. Ces dispositifs de récupération de la houle pourraient donc favoriser, avec l'énergie éolienne ou l'énergie solaire, l'émergence d'un nouveau concept de port du futur à zéro émission. Le premier exemple opérationnel en Europe de systèmes houlomoteurs « bord à quai » est la digue à colonnes d'eau oscillantes Voith Hydro Wavegen de Mutriku au Pays Basque espagnol qui a été inaugurée en 2011. Les côtes françaises en particulier sur l'océan Atlantique mais aussi en Outre-Mer disposent d'un très bon potentiel houlomoteur au large qui pourrait, sur certains sites, être valorisé « bord à quai » ou « en proche côtier ».

LES SYSTÈMES DE RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE DE LA HOULE BORD À QUAI

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), plus de cent systèmes de conversion de l'énergie sont en développement dans le monde. Parmi ceux-ci, beaucoup peuvent être intégrés dans les structures côtières. Des évaluations basées sur des critères objectifs sont

nécessaires pour trier ces systèmes et déterminer les solutions les plus prometteuses.

Malheureusement, peu de données sont disponibles dans la littérature. Pour déterminer les caractéristiques des techniques de récupération de l'énergie de la houle, il est nécessaire de les classer en quatre familles principales :

- Bras oscillant mu par un flotteur (figure 2) ;
- Colonne d'eau oscillante (figure 3) ;
- Systèmes à franchissements (figure 4) ;
- Batteurs immergés devant l'ouvrage (figure 5).

L'EXPLOITATION DES SYSTÈMES

Les critères de comparaison en matière d'exploitation sont les suivants :

La fiabilité : il s'agit du taux de disponibilité du système, directement lié au taux de panne.

La maintenance : il s'agit des coûts associés à la maintenance préventive et curative du système. Les coûts dépendent de la fiabilité mais aussi de la difficulté spécifique à réparer le système (système immergé *versus* système onshore).

2- Bras oscillant mu par un flotteur selon Delaby Laurent Ingénieurs Conseils.

3- Colonne d'eau oscillante selon Voith Hydro Wavegen.

4- Systèmes à franchissements avec trois réservoirs selon ISL.

5- Ferme de batteurs immergés du type Waveroller.

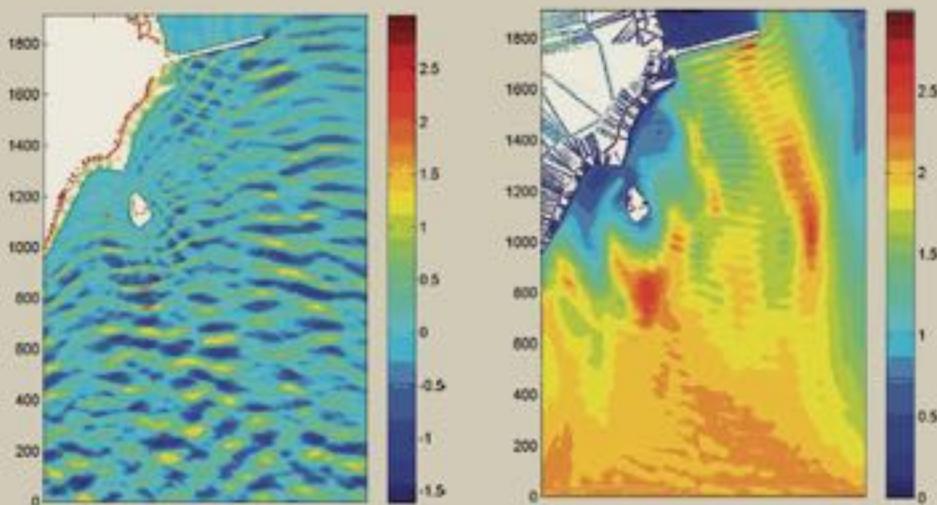
2- Oscillating arm actuated by a float, according to Delaby Laurent Ingénieurs Conseils.

3- Oscillating water column, according to Voith Hydro Wavegen.

4- Crossing systems with three reservoirs, according to ISL.

5- Farm of submerged beaters of the Waveroller type.

RÉSULTATS DE MODÉLISATION : ÉLÉVATION ET HAUTEUR SIGNIFICATIVE (EN MÈTRES) À L'AIDE DU CODE SWASH SUR LE SITE D'ESQUIBIEN - FINISTÈRE



6

© CERENA

6- Résultats de modélisation : élévation et hauteur significative (en mètres) à l'aide du code Swash sur le site d'Esquibien - Finistère.

7- Matrice de puissance (en kW/m) pour un système à franchissements à quatre réservoirs sur Saint-Jean-de-Luz.

6- Modelling results: elevation and significant height (in metres) by means of the Swash code on the Esquibien site, Finistère.

7- Power matrix (in kW/m) for a crossing system with four reservoirs at Saint-Jean-de-Luz.

La survivabilité : il s'agit de la capacité du dispositif à survivre dans des conditions extrêmes.

Pour étudier la survivabilité, il est nécessaire de connaître à la fois la houle et le niveau d'eau en conditions extrêmes. Des codes de calcul comme le code Swash (figure 6) permettent d'obtenir les deux informations. Certains systèmes disposent d'une solution de repli et d'autres non.

La survivabilité est particulièrement sensible lorsque la digue est franchissante (figure 1).

L'ÉCONOMIE DU PROJET

Les critères de comparaison en ce qui concerne l'économie du projet sont les suivants :

Le coût d'investissement : outre le coût du convertisseur (ex : turbine), il peut inclure des coûts importants de génie civil pour les systèmes à franchissements ou les colonnes d'eau oscillantes.

Le rendement de la machine : On l'exprime généralement en termes de largeur de capture, c'est-à-dire le rapport de l'énergie produite par la machine

(en kWh) sur l'énergie disponible dans la même largeur. La production d'énergie étant fonction de la période de pic et de la hauteur significative des vagues incidentes, on détermine la matrice de puissance (en kW/m) du dispositif houlomoteur envisagé.

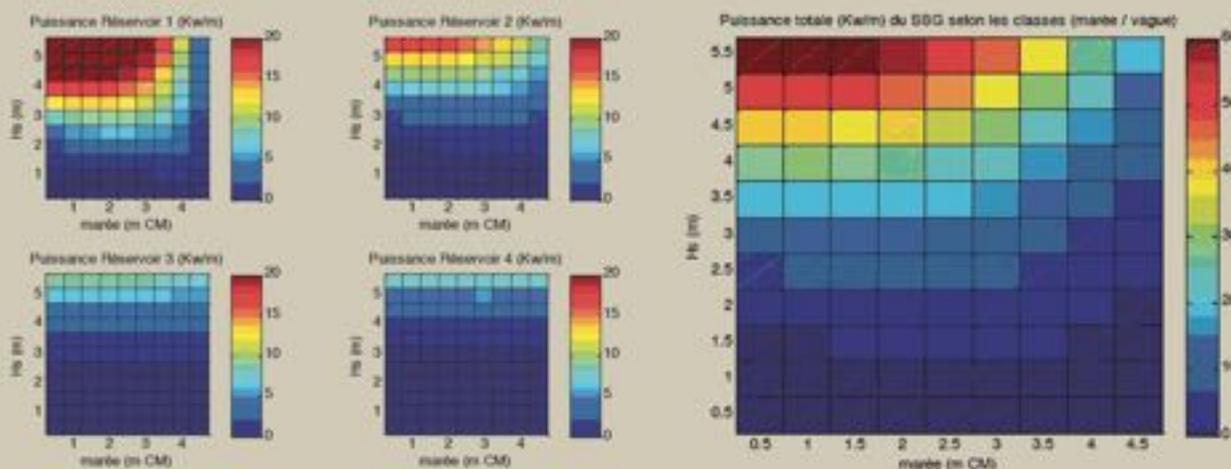
À titre d'exemple, la matrice de puissance d'un système à franchissements à quatre réservoirs sur le site de Saint-Jean-de-Luz est illustrée figure 7 par les résultats obtenus par l'Université de Pau Pays de l'Adour.

Le laboratoire LHEEA de L'École Cen-

trale de Nantes fournit des estimations du rendement pour les quatre familles de système : 34 % pour les colonnes d'eau oscillantes, 13 % pour les systèmes à franchissements, 9 % pour les bouées oscillantes de petite taille (et respectivement 29 % pour les bouées oscillantes de grande taille), 41 % pour les batteurs immergés. Ces chiffres sont donnés pour des configurations optimales et surestiment certainement le rendement obtenu en pratique.

Pour les bouées et les batteurs ces rendements sont estimés sans la digue.

MATRICE DE PUISSANCE (en kW/m) POUR UN SYSTÈME À FRANCHISSEMENTS À QUATRE RÉSERVOIRS SUR SAINT-JEAN-DE-LUZ



7

© UNIVERSITÉ DE PAU PAYS DE L'ADOUR



© PARLIER ENVIRONNEMENT
8

La présence de la digue peut améliorer sensiblement les performances (en théorie les multiplier par 2 pour une digue parfaitement réfléchissante pour un capteur pilonnant au droit de la digue).

Pour de l'énergie convertie en électricité, il faut également prendre en compte les pertes d'énergie liées aux autres composantes du système.

Il ne faut pas confondre le rendement et le facteur de charge qui est le rapport entre l'énergie produite sur une période donnée par rapport à l'énergie produite si la machine opérait toujours à sa capacité maximale.

8- Végétation aquatique devant la digue d'Esquibien.

8- Aquatic vegetation in front of the Esquibien breakwater.

L'ADAPTATION AU SITE

Les systèmes n'ayant pas tous les mêmes capacités, on devra les sélectionner en fonction du type d'ouvrage et de la bathymétrie. Selon les tech-

nologies, le système n'est pas adapté à une digue franchissante car le franchissement peut induire des problèmes importants de survivabilité.

Pour des petites profondeurs (inférieures à 5 m C.M.) certaines technologies peuvent connaître des difficultés à cause du risque de déferlement sur l'équipement à marée basse. Il semble nécessaire de retenir un seuil minimal de profondeur à marée basse.

Mais, dans cette hypothèse, dès que le niveau d'eau s'élèvera, le rendement de certains systèmes, notamment ceux posés sur le fond, s'en trouvera réduit dans la mesure où les vitesses des

particules fluides s'atténuent en profondeur par rapport à celles intéressant les tranches supérieures de la mer. Enfin les digues à talus peuvent causer des problèmes d'intégration.

LE GÉNIE CIVIL

Il ne faut jamais oublier que la conversion d'énergie est seulement une fonction secondaire de la structure côtière. La fonction primaire est d'abord la protection. Il est donc nécessaire de vérifier si l'intégration du système houlomoteur ne modifie pas la stabilité et la performance en matière de volume de franchissements et d'évaluer les conséquences sur les coûts de construction. L'intégration d'un système houlomoteur dans les structures côtières sera toujours plus facile pour une nouvelle structure que pour une structure existante. Dans ce dernier cas, des informations sur l'ouvrage sont indispensables. Les technologies adaptées diffèrent en fonction du climat de houle mais aussi du type de structure (digues en enrochements ou digues verticales). L'absorption de l'énergie des vagues change l'hydrodynamique autour de la structure. En présence d'un fond mobile devant la digue, des dépôts ou des affouillements peuvent se produire.

L'ENVIRONNEMENT

Les espèces animales peuvent être gênées par le changement de l'hydrodynamique mais aussi par le bruit sous-marin généré par les machines. Le bruit aérien est également un impact environnemental à considérer notamment pour les colonnes d'eau oscillante.

De plus, il convient de vérifier que la végétation aquatique (figure 8) ne constitue pas un handicap sérieux à la mise en place des systèmes houlomoteurs. De la même façon, l'impact du *fouling* (dépôt non désiré de toute nature se développant sur toute surface en particulier immergée) sur le fonctionnement du dispositif doit être examiné.

APPLICABILITÉ COMPARÉE DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES

Le tableau 1 résume, sous forme d'une synthèse multi-critères, les premières conclusions ou avis généraux issus des diverses études menées dans le cadre d'EMACOP sur l'adéquation des quatre types de houlomoteurs « bord à quai » retenus vis-à-vis d'une série de critères dans le choix d'une structure. Les cases oranges indiquent des contraintes pouvant amener à abandonner une technologie. ▶

TABLEAU 1 : ÉVALUATION MULTICRITÈRES (4 : Très bon, 3 : Bon, 2 : Moyen, 1 : Faible)

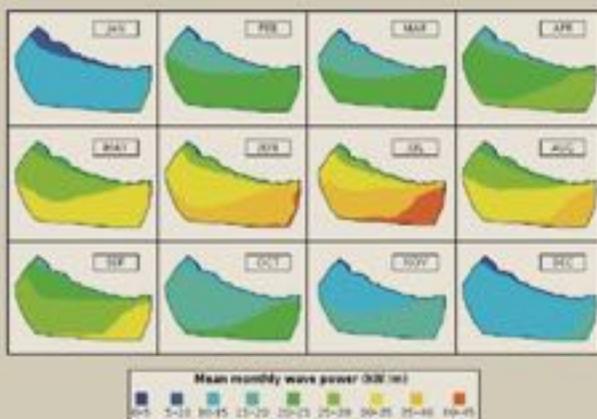
	Colonne d'eau oscillante	Système à franchissements	Bras oscillants sur flotteurs	Volets oscillants
Fiabilité	4	4	2	2
Maintenance	4	3	4	1
Survivabilité	4	4	2	3
Coûts d'investissement	1	1	4	3
Rendement	3	1	2	4
Adaptation aux ouvrages franchissants	1	4	1	4
Adaptation au marnage	2	2	4	2
Adaptation aux petites profondeurs	2	4	1	1
Adaptation aux digues à talus	2	2	1	4
Impact sur le génie civil	2	1	3	4
Environnement	1	2	4	1
Paysage	2	1	3	4
Effet de série	2	1	3	4
Maturité de la technologie	4	2	3	3

a) Flotteur pilonnant sur pieu b) Flotteur pilonnant relié à la digue



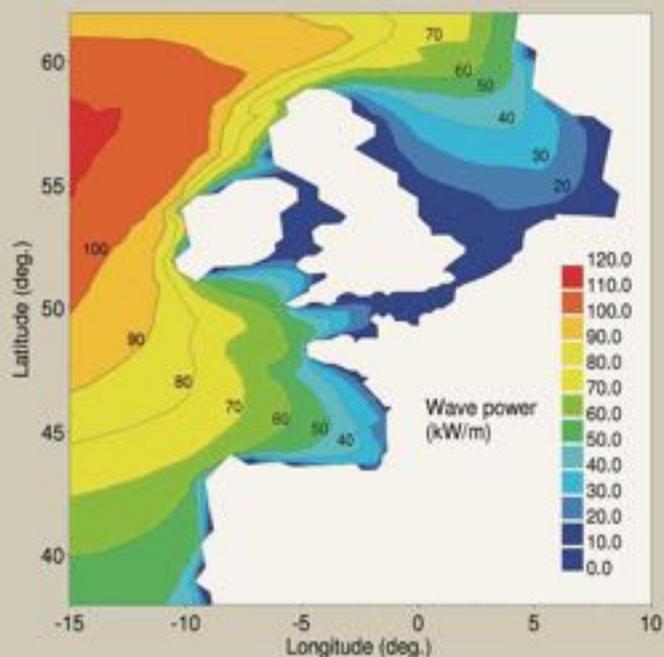
9

POTENTIEL HOULOMOTEUR MOYEN EN kW/m
à la Réunion selon EDF



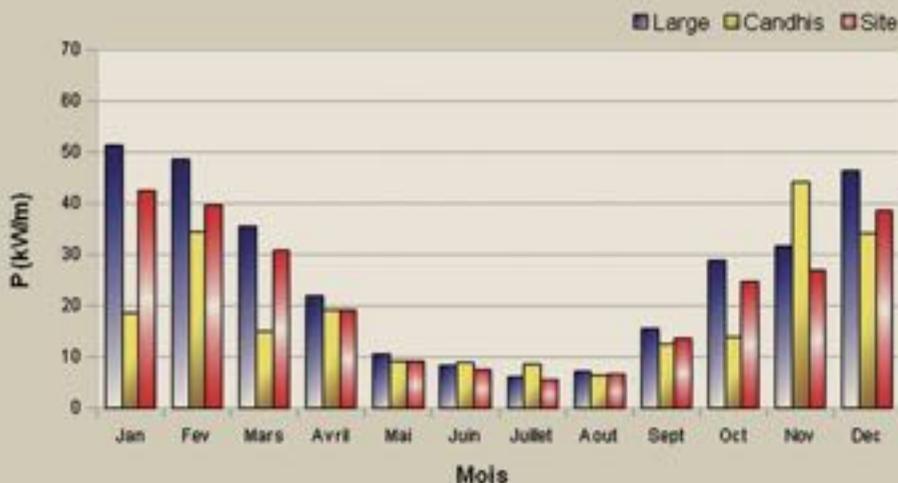
11

POTENTIEL HOULOMOTEUR MOYEN
en Europe en kW/m selon EDF



10

POTENTIEL HOULOMOTEUR MENSUEL EN kW/m
à Saint-Jean-de-Luz selon le Cerema / EGIS International



12

© CEREMA

9- 9a : systèmes détachés, 9b : systèmes bord à quai.

10- Potentiel houlo-moteur moyen en Europe en kW/m selon EDF.

11- Potentiel houlo-moteur moyen en kW/m à la Réunion selon EDF.

12- Potentiel houlo-moteur mensuel en kW/m à Saint-Jean-de-Luz selon le Cerema / Egis International.

LES SYSTÈMES DE RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE DE LA HOULE EN PROCHE CÔTIER

Compte tenu de la géométrie de la digue, des franchissements observés lors des tempêtes, de la faible profondeur à marée basse et de l'amplitude du marnage du site, la présence de l'ouvrage peut parfois ne pas être directement mise à profit pour installer un des quatre types de systèmes houlomoteurs dits « bord à quai » (figure 9b) envi-

sagés, à moins d'un renforcement très significatif de la structure même de l'ouvrage existant au droit de l'installation. La mise en œuvre de systèmes houlomoteurs dit « détachés » de l'ouvrage (figure 9a) doit alors être envisagée sur le site mais avec une implantation par des profondeurs plus importantes. Une variante du bras articulé mu par un flotteur est de disposer les éléments autour d'un pieu fixé sur les fonds marins par des profondeurs d'une

dizaine de mètres. Plusieurs options techniques sont envisageables. Une des solutions envisagées consiste à relier un flotteur couissant autour du pieu à un réseau de vérins hydrauliques verticaux qui sont fixés en partie haute à une plateforme horizontale immobile. Le système houlomoteur peut aussi être installé sur un ponton. Pour les flotteurs, les options sont donc les suivantes avec pour chacune un exemple de technologie :

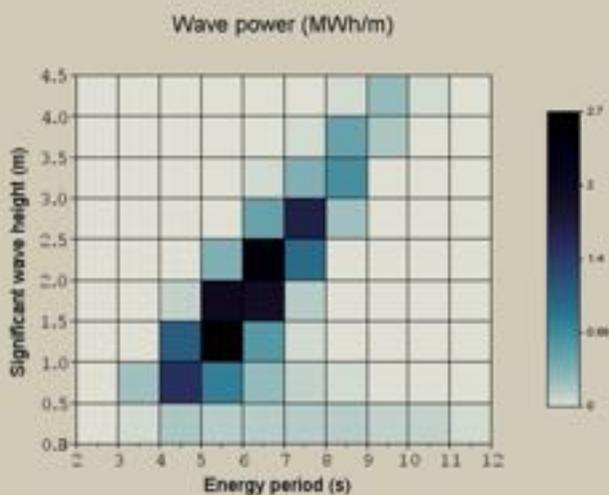
9- 9a: Detached systems, 9b: Quay-side systems.

10- Average wave-power potential in Europe in kW/m, according to EDF.

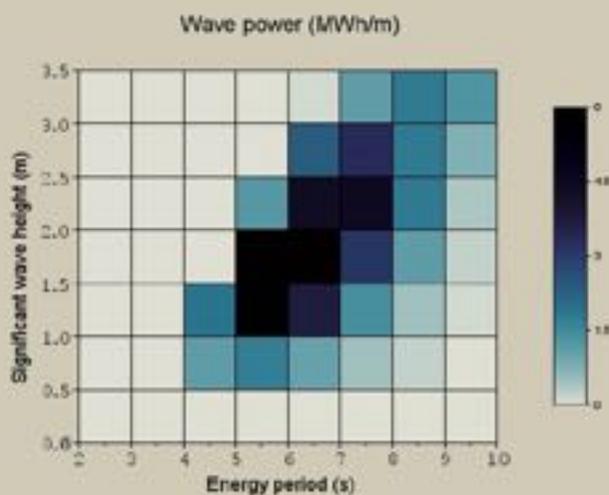
11- Average wave-power potential in kW/m on Reunion Island, according to EDF.

12- Average wave-power potential in kW/m at Saint-Jean-de-Luz, according to Cerema/Egis International.

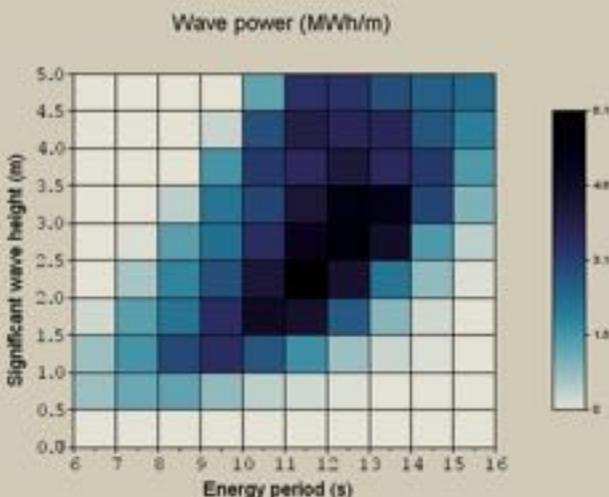
DISTRIBUTION D'ÉNERGIE DE LA HOULE
(matrice de ressource en MWh/m) PAR AN
pour les états de mer des sites de Antifer, Esquibien et Saint-Jean-de-Luz
définis par la hauteur de houle devant le site et la période énergétique



13a



13b



13c

13- Distribution d'énergie de la houle (matrice de ressource en MWh/m) par an pour les états de mer des sites de Antifer, Esquibien et Saint-Jean-de-Luz définis par la hauteur de houle devant le site et la période énergétique.

13- Distribution of wave power (resource matrix in MWh/m) per year for sea conditions at the Antifer, Esquibien and Saint-Jean-de-Luz sites, defined by the wave height in front of the site and the energy period.

Cet atlas a permis d'obtenir le potentiel houlomoteur moyen en kW/m (figure 10).

Les bases de données d'état de mer ANEMOC ont été améliorées en utilisant une période temporelle plus conséquente (plusieurs décennies), avec une résolution spatio-temporelle plus fine, et un niveau d'information plus détaillé. De plus les effets de faible profondeur d'eau, l'interaction avec la marée et la diffraction en présence d'obstacles (îles, pointes, ...) ont été intégrés dans la modélisation. Cela permet de produire désormais des cartes de potentiel houlomoteur jusqu'à 1 km des côtes (ANEMOC 2).

Une caractérisation plus fine des états de mer est obtenue (en fonction de la direction, de la période) mais aussi des saisons (figure 11, la ressource houlomotrice mensuelle moyenne sur le modèle local de la Réunion).

Pour obtenir le potentiel houlomoteur « bord à quai » à partir des données au large, une modélisation à l'aide du modèle de propagation de houle SWAN a été développée à Saint-Jean-de-Luz. Les résultats mensuels ont été comparés avec le modèle empirique de Goda utilisé par l'équipe Cerema/Egis International (figure 12).

Une formule simplifiée approximative, la méthode analytique de Goda a été employée pour propager la houle du large à la côte et caractériser le potentiel énergétique sur 22 sites en France. Cette méthode présente certaines limites pour décrire les processus de réfraction, de réflexion et de diffraction de la houle. La diffraction autour des obstacles, qui peut s'interpréter comme un processus de transfert d'énergie des zones les plus agitées vers les moins agitées, reste compliquée à formuler et n'est pas intégrée à la méthode. ▷

- Les bras articulés reliant le flotteur à la digue (Wave energy hyperbaric converter en test dans le port de Pecem au Brésil) ;
- Les systèmes sur pieu (Seacap) ;
- Les systèmes sur ponton (Waves-tar).

LE POTENTIEL HOULOMOTEUR EN FRANCE

L'atlas de houle le long des côtes européennes ANEMOC a été établi à partir du modèle de propagation de vagues TOMAWAC en modélisant les états de mer sur 25 années à partir des données météorologiques archivées.

L'IREX

L'Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil (IREX), association à but non lucratif, regroupe plus de 60 membres adhérents représentant tous les acteurs du secteur de la construction. Il a pour objet principal le montage et le suivi d'actions de recherche collective dans le domaine de la construction, financées en commun par plusieurs partenaires. Depuis l'origine des Projets Nationaux de R&D montés et gérés par l'IREX, plus de 300 sociétés ou organismes (professionnels et chercheurs) ont participé ou participent à cette recherche collective. L'IREX intervient dans des programmes de recherche appliquée (Projets Nationaux, projets ANR, etc.) ayant des retombées pratiques à court terme pour la conception des ouvrages et des infrastructures ou la réalisation des chantiers. Les partenaires impliqués représentent tous les acteurs de la chaîne de l'« acte de construire ».

LE CEREMA

Le nouvel établissement public au service de l'État et des collectivités territoriales dans le domaine du développement durable.

Depuis le 1^{er} janvier 2014 ; les 8 Cete, le Certu, le Cetmef et le Setra ont fusionné pour former le Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

Placé sous la tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère de l'égalité des territoires et du logement, le Cerema est le centre de ressources d'expertises scientifiques et techniques intervenant en appui à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques portées par les services de l'État et les collectivités territoriales.

Une classification des 22 sites est établie à partir de critères de bathymétrie, de puissance de houle annuelle et hivernale et de longueur de digue pouvant être équipée d'un système houlomoteur (voir encadré « Les 22 sites d'étude »).

L'évaluation préliminaire a permis de sélectionner 9 sites d'études de fort potentiel, répartis sur les façades maritimes de la Manche pour 3 d'entre eux et de l'Atlantique pour les 6 autres. Il faut souligner que les sites présentant les niveaux de puissance de houle les plus forts (de 25 à 50 kW/m calculés au large et de 20 à 25 kW/m sur les sites), se situent à la pointe de la Bretagne et dans le Pays Basque, comme l'indiquent d'ailleurs les résultats de niveaux de puissance de houle au large issus de la base de données ANEMOC. Le transfert d'énergie du large à la côte est fortement atténué pour les sites bretons, avec une perte d'énergie d'un facteur 1/2 passant de 44,3 kW/m au large à 21,1 kW/m sur le site de Saint-Guénolé et d'un facteur 1/6 avec 6,9 kW/m sur le site d'Esquibien.

Par contre, l'énergie transférée est conservée pour les sites basques, passant de 25,8 kW/m au large à 21,8 kW/m sur le site de Saint-Jean-de-Luz.

Ces deux types de transfert s'expliquent par les configurations bathymétriques très différentes des sites. En Bretagne, le plateau continental et la configuration complexe et découpée des côtes atténuent fortement l'énergie des houles du large. Dans le Pays Basque, la présence du gouf du Cap breton dans les Landes favorise au contraire leur transfert.

Des exemples de matrices de ressource (distribution de probabilité sur les variables hauteur de houle significative et période énergétique) de quelques sites sont présentés (figure 13).

L'énergie produite par le récupérateur est obtenue en multipliant cette matrice de ressource par la matrice de puissance du système houlomoteur.

En ce qui concerne les systèmes détachés pouvant servir en protection de littoral, le site le plus intéressant parmi les sites évalués se situe à la Pointe des Baleines, sur le littoral de la com-

mune de Saint-Clément-des-Baleines. Une analyse plus approfondie du site de l'île de Ré est nécessaire ; elle présente trois composantes : la technologie de récupération de l'énergie et le rendement, l'efficacité vis à vis des problèmes d'érosion rencontrés, l'impact environnemental et social d'un tel projet.

CONCLUSION

Afin de pouvoir déployer les dispositifs de récupération de l'énergie de la houle bord à quai ou en proche côtier, il convient désormais de fournir de manière précise la production annuelle d'électricité attendue ainsi que les variations journalières et mensuelles pour chaque site et son dispositif associé.

De la même manière, le dispositif doit être dimensionné et donc évalué par rapport aux événements extrêmes. Après avoir évalué ces deux composantes essentielles, il sera possible d'estimer le coût du kWh et l'intérêt économique de ces nouveaux systèmes. □

LES 22 SITES D'ÉTUDE

Les 22 sites d'étude se répartissent en trois niveaux de potentiel houlomoteur :

UN NIVEAU FAIBLE POUR 8 SITES D'ÉTUDE : Molène (29) ; Groix, Belle-Ile (56) ; Le Croisic (44) ; L'Herbaudière, Port de Morin, Port-Joinville (85) ; La Cotinière (17).

UN NIVEAU MOYEN POUR 5 SITES D'ÉTUDE : Boulogne-sur-Mer (62) ; Roscoff, Lesconil (29) ; Quiberon (56) ; Les Sables d'Olonne (85).

UN NIVEAU FORT POUR 9 SITES D'ÉTUDE : Antifer (76) ; Cherbourg, Flamanville (50) ; Le Conquet, Esquibien, Saint-Guénolé (29) ; Saint-Gilles-Croix-de-Vie (85) ; Bayonne, Saint-Jean-de-Luz (64).

ON CONTRIBUÉ À LA RÉDACTION DE L'ARTICLE

CEREMA : Philippe Sergent, François Roper, Bertrand Michard, Emmanuel Cosquer

ÉCOLE CENTRALE DE NANTES : Alain Clément, Virginie Baudry

IREX : Brice Delaporte, Directeur Technique

FNTP : Philippe Gotteland, Direction Technique Recherche

ABSTRACT

RECOVERING MARINE ENERGY WITH WAVE-POWER DEVICES: PART OF THE NATIONAL EMACOP PROJECT

PHILIPPE SERGENT, CEREMA - ALAIN CLÉMENT - VIRGINIE BAUDRY

Ageing coastal structures are faced with problems of stability. They must be modernised and adapted, partly to cope with climate change and the rise in the average sea level, and partly to cope with changes in maritime activities such as the advent of giant container carriers. This is an opportunity to include energy recovery systems. The National EMACOP (Energies Marines Côtières et Portuaires) Project aims at the recovery of marine energies in coastal and port areas. These energies are recovered via tidal power plants, seawater heat pumps, tidal power generators and wave-operated devices. Of these technologies, it is the recovery of wave power on the edge of quays that is most closely related to structure design. □

RECUPERACIÓN DE LAS ENERGÍAS MARINAS POR DISPOSITIVOS UNDIMOTRICES: UN CAPÍTULO DEL PROYECTO NACIONAL EMACOP

PHILIPPE SERGENT, CEREMA - ALAIN CLÉMENT - VIRGINIE BAUDRY

Las estructuras costeras envejecen y se plantean problemas de estabilidad. Deben modernizarse y adaptarse, por una parte, al cambio climático y a la elevación del nivel medio del mar y, por otra, a la evolución de las actividades marítimas como la llegada de los grandes portacontenedores. Constituye una oportunidad para integrar sistemas de recuperación de la energía. El Proyecto Nacional EMACOP (Energías Marinas Costeras y Portuarias) tiene como objetivo la recuperación de las energías marinas en zona costera y portuaria. Estas energías pueden recuperarse a través de plantas mareomotrices, bombas de calor de agua de mar, turbinas hidráulicas que utilizan la energía cinética de las corrientes marinas o dispositivos que funcionan con el oleaje. Entre estas tecnologías, la recuperación de la energía del oleaje a lo largo de los muelles es la que está más vinculada al dimensionamiento de las estructuras. □



I R E X
Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil



DE LA RECHERCHE À LA PRATIQUE

UNE RECHERCHE COLLABORATIVE DYNAMIQUE

- ▶ Programmes de recherche appliquée (Projets Nationaux, projets ANR, etc.) ayant des retombées pratiques à court terme pour la conception des ouvrages et des infrastructures ou la réalisation des chantiers.
- ▶ Emergence de nouveaux projets collaboratifs, définition des besoins de recherche collective



LES PROJETS NATIONAUX

- ▶ L'I R E X : une organisation adaptée à l'administration des « Projets Nationaux »
- ▶ Les Projets Nationaux : Dispositif de mise en œuvre de la R&D collaborative dans le domaine de la construction, soutenu par l'Etat (Ministère(s) en charge du Développement Durable)
- ▶ Un outil unique offrant un cadre **souple et adapté aux recherches multipartenaires**



UN ORGANISME FÉDÉRATEUR, OPÉRATIONNEL

- ▶ Montage et suivi d'actions de recherche collective dans le domaine de la construction
- ▶ Plus de 300 partenaires impliqués représentant tous les acteurs de la chaîne de l'« acte de construire » : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre publics et privés, bureaux d'études, ingénieries, entreprises de construction, industries productrices composants de la construction, organismes de recherche, etc.



DES ACQUIS RECONNUS

- ▶ Plus de 30 projets nationaux administrés depuis plus de 25 ans
- ▶ Des retombées opérationnelles en France et à l'international



DE LA RECHERCHE À LA PRATIQUE

30
PROJETS
NATIONAUX

300
PARTENAIRES

www.irex.asso.fr
9 rue de Berri
75008 PARIS

LES HYDROCARBURES DE ROCHE-MÈRE : UN AVENIR À CONSTRUIRE

AUTEUR : ROLAND VIALLY, DIRECTION GÉOSCIENCES, IFP ÉNERGIES NOUVELLES

D'ICI 2035, LA PRODUCTION DES HYDROCARBURES CONVENTIONNELS NE SUFFIRA PAS. POUR PRODUIRE DES HYDROCARBURES DE ROCHE-MÈRE (PÉTROLE ET GAZ DE SCHISTE) PIÉGÉS DANS LA ROCHE OÙ ILS SE SONT FORMÉS, IL FAUT UTILISER MASSIVEMENT LE FORAGE HORIZONTAL ET LA FRACTURATION HYDRAULIQUE. MALGRÉ UNE EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE SUPÉRIEURE À UNE PRODUCTION CLASSIQUE, LE DÉVELOPPEMENT RAPIDE DE CES PRODUCTIONS AUX USA A PERMIS UNE CHUTE DU PRIX DU GAZ ET UN AVANTAGE COMPÉTITIF CERTAIN. LES RESSOURCES MONDIALES SONT CONSIDÉRABLES. L'AVENIR DE L'EXPLOITATION DE CES RESSOURCES RESTE INCERTAIN.



© IAN WEST (2009)

Depuis que les États-Unis se sont engagés, il y a quelques années, dans la production de gaz et de pétrole de schiste, les équilibres énergétiques mondiaux ont été bouleversés. Ils devraient l'être plus encore, à mesure que d'autres pays détenteurs de ces hydrocarbures non conventionnels vont se lancer dans leur exploitation. Cette manne nouvelle, qui pourrait repousser l'échéance du « *peak oil* », offrira-t-elle une occasion de réaliser la transition énergétique prônée depuis longtemps ou un

moyen de la renvoyer à plus tard ? Le rapide développement de l'exploitation du gaz de schiste puis du pétrole de schiste aux États-Unis, avec ses conséquences économiques mais aussi environnementales, a replacé la transition énergétique à la une de l'actualité ces dernières années. Si, comme on l'envisage, la demande énergétique mondiale devait augmenter de plus de 35 % dans les vingt-cinq prochaines années, quelle sera la part des hydrocarbures de roche-mère dans le futur mix énergétique ?

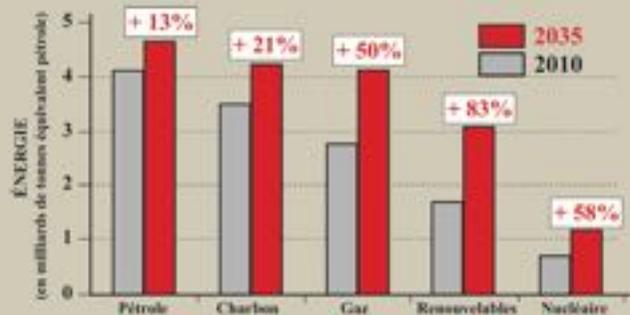
Affleurement des « **Kimmeridge Clays** » (roche-mère) dans le sud de l'Angleterre.

Kimmeridge Clays outcrop (bedrock) in southern England.

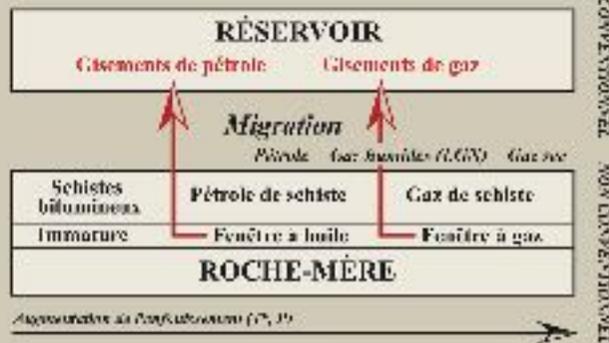
UNE DEMANDE CROISSANTE D'ÉNERGIE

La transition énergétique s'est amorcée dès la fin des années 1970 à la suite des deux chocs pétroliers. Elle s'est accélérée ces dernières années sous l'effet d'une prise de conscience mondiale des impacts sur l'environnement de l'utilisation des énergies fossiles. D'après les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), dans son scénario tenant compte des efforts pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'augmen-

ÉVOLUTION DE LA RÉPARTITION DE LA DEMANDE EN ÉNERGIE



1



3

1- Évolution de la répartition de la demande en énergie.

2- Typologie des hydrocarbures non conventionnels.

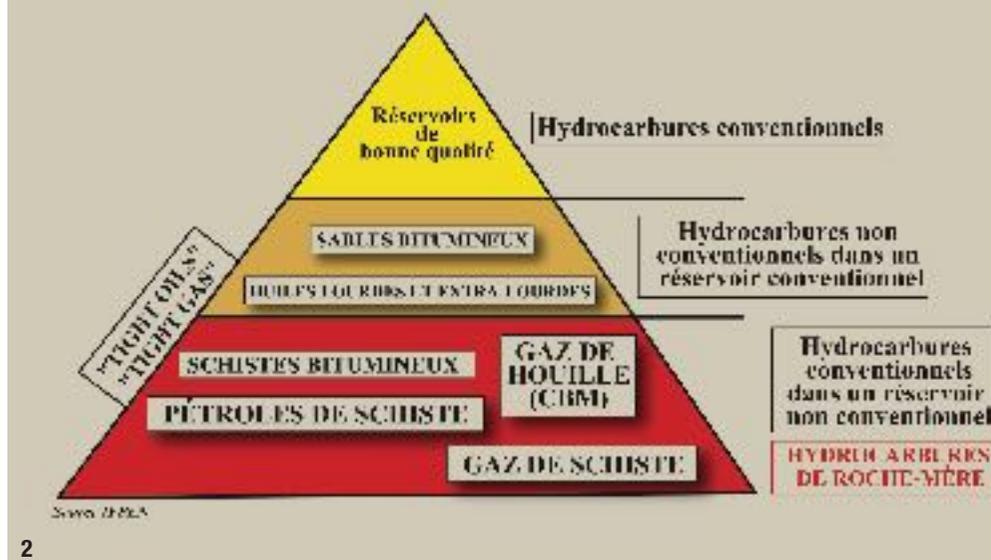
3- Les relations entre schistes bitumineux, pétrole et gaz de schiste et entre gisements conventionnels et non conventionnels.

1- Changes in the distribution of energy demand.

2- Classification of unconventional hydrocarbons.

3- Relations between oil shales and shale oil and gas, and between conventional and unconventional deposits.

TYPLOGIE DES HYDROCARBURES NON CONVENTIONNELS



2

pétrole devrait augmenter plus faiblement (+0,5% par an).

On peut donc indéniablement parler de transition énergétique pour qualifier la période 2010-2035, même si celle-ci se réalisera lentement. En 2035, les énergies renouvelables pourraient représenter 18% de l'énergie mondiale consommée, contre 13% en 2010, cependant que, en valeur absolue, la production d'énergies fossiles - et plus particulièrement d'hydrocarbures - pourrait augmenter au moins jusqu'en 2035. En effet, pour répondre à la hausse de la demande énergétique mondiale, la production d'hydrocarbures va devoir continuer d'augmenter. En 2035, elle devrait atteindre 100 millions de barils par jour - contre 86 millions en 2012 -, et celle de gaz pourrait se situer à 5 000 milliards de mètres cubes par an - contre 3 500 en 2012 (figure 1).

Ces projections montrent donc que l'effort d'exploration et de production

d'hydrocarbures ne doit pas être relâché. Pour les hydrocarbures liquides, les réserves prouvées sont estimées à plus de 1 667 milliards de barils, elles ne sont cependant pas suffisantes pour répondre à la demande.

À cette fin, plusieurs axes de progrès sont à suivre simultanément :

→ Un meilleur taux de récupération des hydrocarbures déjà découverts dans les gisements conventionnels (réserves additionnelles). Pour le pétrole, ce taux n'est que de 33% environ. Une augmentation de quelques points grâce à l'amélioration des techniques de récupération permettrait de produire 450 milliards de barils supplémentaires sur l'ensemble de la période 2010-2035.

→ La découverte de nouveaux gisements dans des bassins sédimentaires dont le potentiel pétrolier est déjà reconnu ou dans des zones encore peu explorées (deep offshore, Arctique) ; ces nouvelles découvertes pourraient contribuer

à hauteur de 400 milliards de barils. → L'exploration et la production d'hydrocarbures non conventionnels semble donc indispensable à hauteur de 650 milliards de barils.

Les réserves prouvées en hydrocarbures gazeux sont beaucoup plus importantes que pour les hydrocarbures liquides. Les hydrocarbures gazeux non conventionnels devraient cependant contribuer pour 40 000 milliards de m³.

LES HYDROCARBURES NON CONVENTIONNELS : UNE ÉVOLUTION PLUS QU'UNE RÉVOLUTION

Les hydrocarbures non conventionnels constituent donc une des solutions pour parvenir à ce que la production réponde à la demande dans les années à venir.

UNE DÉFINITION FLOUE

Il n'existe pas de définition communément admise de ce qu'est un hydrocarbure non conventionnel.

AFFLEUREMENT DES « KIMMERIDGE CLAYS » DANS LE SUD DE L'ANGLETERRE

Affleurement des Kimmeridge Clays (roche-mère au sens large) dans le Dorset



Niveau "Blackstone"
très riche en matière organique
(roche-mère au sens strict)



Petit bancs calcaires montrant une
fracturation naturelle



4

© JAN WEST (2005)

4- Affleurement des « Kimmeridge Clays » dans le sud de l'Angleterre. Cette roche-mère est celle qui a fourni une grande partie des gisements d'hydrocarbures de la mer du Nord. Cette roche-mère est constituée de niveaux argileux riches en matière organique (niveaux plus noirs sur la photo) et de niveaux plus gréseux ou carbonatés. Produire les hydrocarbures contenus dans cette roche nécessite l'amélioration de techniques déjà existantes.

4- Kimmeridge Clays outcrop in southern England. This bedrock is that which provided a large part of the North Sea oil and gas deposits. This bedrock consists of clayey levels rich in organic matter (darkest levels on the photo) and more gravelly or carbonaceous levels. To produce the oil and gas contained in this rock, the already existing techniques must be improved.

Il s'agit donc d'une notion floue et qui évolue en fonction des avancées technologiques. L'offshore profond en est un bon exemple puisqu'on a longtemps considéré qu'il recelait des hydrocarbures non conventionnels, avant que les nombreux développements de champs pétroliers et gaziers par grande profondeur d'eau n'invitent à revenir sur cette classification. La production d'hydrocarbures dans l'offshore profond est désormais considérée comme conventionnelle.

UNE ORIGINE COMMUNE

D'un point de vue strictement géologique, les hydrocarbures conventionnels et non conventionnels résultent d'un seul et même processus, la transformation de la matière organique contenue

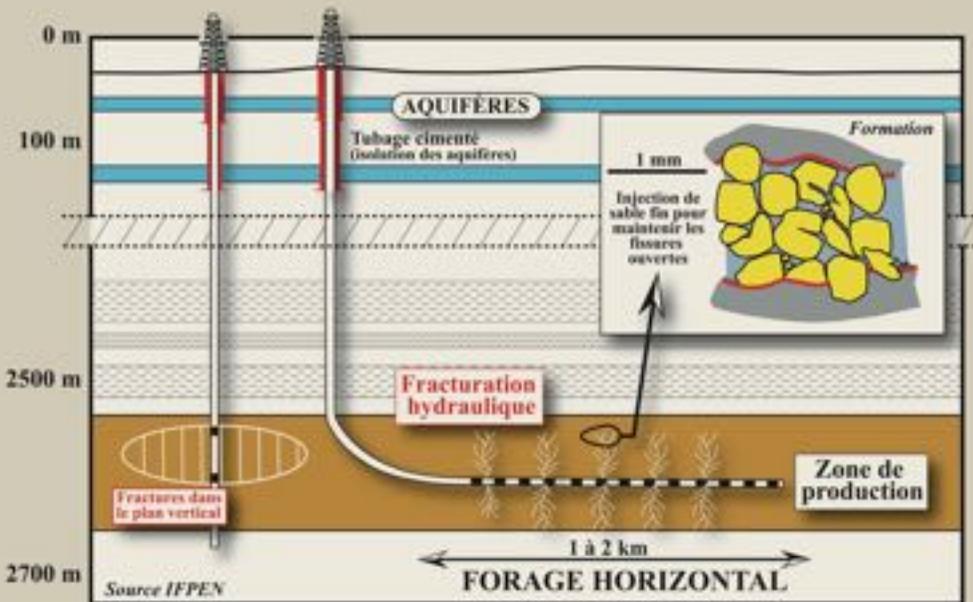
dans certaines couches géologiques - la roche-mère - au cours des temps géologiques par augmentation de la pression et de la température à mesure de l'enfouissement.

Pour obtenir des hydrocarbures liquides (pétrole), il faut que la température de la roche-mère atteigne 70 à 80 °C, ce qui correspond à un enfouissement de l'ordre de 3 km. Pour les hydrocarbures gazeux, cette température doit atteindre 100 à 110 °C. Dans le cas des **gisements dits conventionnels**, une partie plus ou moins importante des hydrocarbures générés dans la roche-mère est expulsée hors de cette roche-mère. Par simple gravité, les hydrocarbures liquides ou gazeux (plus légers que l'eau contenue dans les sédiments) se déplacent vers une roche

poreuse et perméable « le réservoir » dans laquelle ils vont pouvoir se stocker. Si, au-dessus de ce réservoir, il existe une couche imperméable « la couverture » qui empêche la migration de ces hydrocarbures jusqu'à la surface et qu'une structure tectonique « le piège » permet de les concentrer, on a alors un gisement conventionnel qui sera d'autant plus facile à exploiter que la qualité du réservoir sera bonne (figure 2). Ces gisements conventionnels nécessitent donc la réunion d'une série de facteurs favorables dans une même partie d'un bassin sédimentaire. On peut dès lors les considérer comme des « anomalies géologiques » expliquant leur rareté. Les gisements non conventionnels peuvent quant à eux être classés en deux grandes catégories :

→ **Les hydrocarbures non conventionnels contenus dans des réservoirs conventionnels.** Il s'agit généralement de gisements conventionnels qui ont subi d'importantes altérations du fait d'aléas géologiques. Dans le cas des sables bitumineux canadiens comme des huiles lourdes et extra-lourdes vénézuéliennes, ce sont des gisements conventionnels qui ont subi une forte altération bactérienne lors de leur remontée vers la surface. La partie « légère » des hydrocarbures a disparu et ne restent dans le réservoir que des hydrocarbures « lourds » ayant une forte densité et une très forte viscosité. Ces caractéristiques physico-chimiques ne permettent pas de les produire avec des méthodes conventionnelles et ils font l'objet d'une exploitation minière

FORAGE HORIZONTAL ET FRACTURATION HYDRAULIQUE



L'EXPLOITATION DES HYDROCARBURES DE SCHISTE AUX ÉTATS-UNIS : SUCCÈS ET INTERROGATIONS.

Les États-Unis ont commencé à exploiter du gaz de schiste dès 1821, sur la commune de Fredonia dans l'État de New York - soit 38 ans avant le fameux puits pétrolier du « colonel » Drake à Titusville en Pennsylvanie. Ce puits de 9 mètres de profondeur dans ce qui allait devenir le Marcellus Shale (bassin de Marcellus) a d'abord alimenté en gaz naturel deux magasins, deux entrepôts et un moulin à farine.

UN DÉFI : PRODUIRE DES HYDROCARBURES DANS UN MILIEU PEU POREUX ET QUASIMENT IMPERMÉABLE

La principale caractéristique des hydrocarbures de roche-mère réside dans le fait que ces hydrocarbures sont piégés dans une roche (« argile ») très peu poreuse et quasiment imperméable. De plus, cette roche-mère est particulièrement hétérogène à l'échelle métrique ou décimétrique. Il faut considérer une roche-mère comme un empilement de couches argileuses riches en matière organique et de bancs plus gréseux ou plus carbonatés (figure 4). Les hydrocarbures sont piégés sous 3 formes :

→ **Dans la porosité de fracture :** Les roches sont soumises au cours des temps géologiques à des contraintes tectoniques qui ont conduit à l'apparition des fractures naturelles qui peuvent contenir des hydrocarbures libres.

→ **Dans la porosité de matrice :** Lors de la transformation de la matière organique en hydrocarbures, le volume diminue, on a alors l'apparition d'une porosité secondaire qui est d'autant plus importante que la roche-mère contient plus de matière organique.

→ **Adsorbés sur la matière organique ou sur la matrice argileuse :** Les hydrocarbures sont alors chimiquement retenus dans la roche et seules des variations de pression et de température permettent de les mobiliser.

UN SUCCÈS REPOSANT SUR DES AVANCÉES TECHNOLOGIQUES

Produire à un coût économique, dans de telles conditions géologiques, des quantités importantes d'hydrocarbures a impliqué des avancées technologiques majeures (figure 5). Ces techniques ont pour but de favoriser la mobilité des hydrocarbures dans la roche-mère en connectant les différentes porosités : ▷

© IFPEN
5

« sable bitumineux » ou sont extraits sur place (*in situ*) en forant des puits⁽²⁾. Les réserves prouvées de pétroles lourds et extra-lourds ont permis au Venezuela de devenir le premier pays en termes de réserves prouvées (298 milliards de barils), devant l'Arabie saoudite (266 milliards de barils) qui devance maintenant le Canada (174 milliards de barils, largement constitués par les sables bitumineux de l'Alberta).

→ Les hydrocarbures conventionnels contenus dans des réservoirs non conventionnels.

Ce sont tous les hydrocarbures contenus dans des réservoirs non conventionnels, et plus particulièrement tous ceux qui sont restés piégés dans une roche-mère argileuse non poreuse et non perméable. Ce sont donc des hydrocarbures « classiques » qui ont été retenus en partie ou en totalité dans la roche-mère. Leur nature dépend directement de la transformation de la matière organique au cours des temps géologiques (figure 3). Quand l'enfouissement n'a pas été suffisant, la matière organique n'a pas été transformée en hydrocarbures, on parle alors de schistes bitumineux (*oil shales*) qu'il faut fortement chauffer pour exprimer et exploiter les hydrocarbures. Quand l'enfouissement est plus important, les hydrocarbures liquides forment le **pétrole de schiste** (*shale oil, tight light oil*). Avec un enfouissement plus important encore, on passe progressivement

5- Forage horizontal et fracturation hydraulique.

5- Horizontal drilling and hydraulic fracturing.

aux **gaz de schiste** (*shale gas*). Il y a donc une continuité entre les différents types d'hydrocarbures de roche-mère. Une partie des hydrocarbures a pu être expulsée de la roche-mère pour former des gisements conventionnels. Dans un même bassin sédimentaire, une même roche-mère peut donc donner naissance à des gisements conventionnels et non conventionnels.

RESSOURCES EN PLACE, RESSOURCES RÉCUPÉRABLES, RÉSERVES PROUVÉES

Des notions bien définies mais qui restent souvent floues...

RESSOURCES EN PLACE : C'est la quantité des hydrocarbures contenus dans la roche-mère ou dans les réservoirs. C'est la valeur (en fait une fourchette de valeurs) estimée par les géologues. Cette valeur ne dépend que des conditions géologiques.

RESSOURCES TECHNIQUEMENT RÉCUPÉRABLES : C'est la part des hydrocarbures en place qu'il est techniquement possible de produire.

RESSOURCES RÉCUPÉRABLES : C'est la part des ressources qu'il est possible de produire à un coût économiquement rentable.

Ces deux dernières valeurs varient en fonction des avancées technologiques mais aussi des prix de vente des hydrocarbures produits.

RÉSERVES PROUVÉES : C'est le volume des hydrocarbures contenus dans des gisements connus en production ou des gisements en cours de développement mais dont le plan de développement est financièrement sécurisé et les autorisations de production acquises (concessions ou licences d'exploitation).

Réserves prouvées mondiales de pétrole : 1 668 milliards de barils.

Réserves prouvées mondiale de gaz : 187 000 milliards de m³.

→ Le **forage horizontal** (ou forage dévié) qui permet de recouper sur de très grandes distances (1 à 3 km) la même couche géologique et ainsi d'assurer une importante surface de contact entre la formation à exploiter et le puits ;

→ La **fracturation hydraulique**, qui fait partie des techniques dites de stimulation de réservoirs, est destinée à améliorer les qualités pétrophysiques des réservoirs pour produire plus d'hydrocarbures. Elle remonte à 1946 mais n'a été employée systématiquement et à grande échelle qu'avec le développement de l'exploitation des gaz de schiste.

Cette méthode consiste à injecter un fluide - généralement de l'eau - à forte pression afin de fissurer la roche pour permettre aux hydrocarbures de se déplacer en direction du puits producteur.

En même temps que l'eau (95%), on injecte des agents de soutènement (*proppant*, 4%, en général du sable), pour que les fissures restent ouvertes, et des produits chimiques (1%) permettant d'améliorer l'efficacité de la fracturation hydraulique. Les volumes injectés sont importants et peuvent atteindre 10 000 à 15 000 m³ par drain horizontal. La fracturation hydraulique a lieu avant la mise en production du puits⁽³⁾.

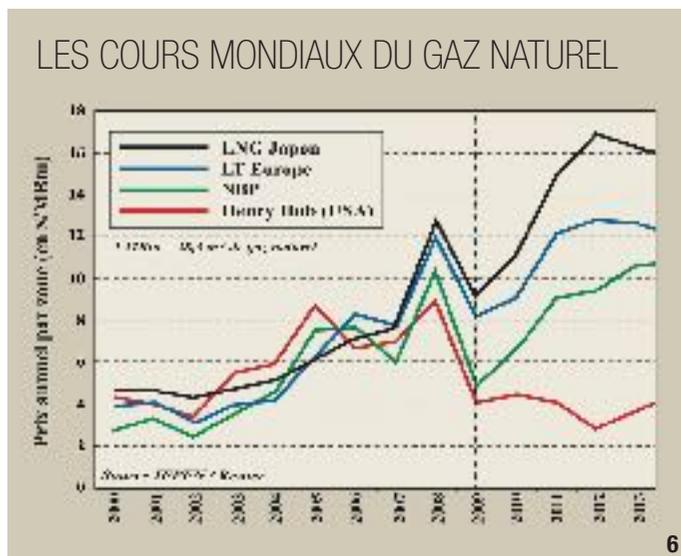
La production américaine des hydrocarbures de roche-mère a bénéficié des expériences acquises lors de la production des « mauvais réservoirs » (« *tight oil* » et « *tight gas* ») qui nécessitent eux aussi l'emploi de la fracturation hydraulique ainsi qu'au début des années 2000 des incitations fiscales pour relancer la production d'hydrocarbures sur le sol américain.

UNE PRODUCTION EN RAPIDE AUGMENTATION QUI A DES CONSÉQUENCES SUR L'ÉCONOMIE AMÉRICAINE

La production de gaz de schiste a véritablement décollé à partir de 2005 au Texas - Barnett, Haynesville, Fayetteville -, en Pennsylvanie et dans l'Ohio - bassin de Marcellus.

La production à la mi-2012 atteint 25 milliards de pieds cubes⁽⁴⁾ par jour, ce qui correspond à plus de 250 milliards de m³ de gaz par an, soit 35% de la consommation des États-Unis et six fois la consommation française.

La production a stagné en 2013 du fait d'un prix du gaz très faible (inférieur à 2 dollars/MBtu⁽⁵⁾), de la difficulté d'acheminement du gaz ainsi que d'un



redéploiement des moyens de production sur le pétrole de schiste.

Les techniques employées pour la production à grande échelle du gaz de schiste s'appliquent parfaitement à celle du pétrole léger de bonne qualité (*tight light oil*). L'essor rapide de la production de pétrole de schiste dans les bassins de Bakken (Dakota du Nord) et d'Eagle Ford (Texas)⁽⁶⁾ est ainsi encore plus surprenant. La production n'a réellement décollé qu'en 2008 mais, en 2013, elle atteint déjà 1,5 million de barils par jour, soit 7% de la consommation américaine et l'équivalent de la production pétrolière de la Libye. Dès 2013, les États-Unis sont redevenus les premiers producteurs mondiaux d'hydrocarbures (pétrole et gaz). La production américaine de pétrole a battu son record de production datant

de 1971 mettant ainsi fin à un déclin de plus de 40 ans et devrait, suivant les prévisions américaines, dépasser la production de l'Arabie saoudite dans les années à venir. Cette production n'est pas sans conséquence sur l'économie américaine. Ce regain de production d'hydrocarbures liquides et gazeux présente des avantages certains, surtout en termes d'indépendance énergétique et de redressement de la balance des paiements. Si la production de pétrole de schiste n'a que peu d'effets sur les cours du pétrole aux États-Unis, la forte progression du gaz de schiste a en revanche fait chuter les prix du gaz - passés de 12 dollars par MBtu en 2008 à 4 dollars par MBtu fin 2013 (figure 6), soit un prix trois fois moins élevé qu'en Europe -, ce qui offre aux entreprises américaines du secteur

6- Les cours mondiaux du gaz naturel. L'essor rapide des gaz de schiste aux USA se traduit par un rapide décrochage du prix du gaz en Amérique du Nord.

6- World prices of natural gas. The rapid development of shale gas in the United States has quickly brought down gas prices in North America.

POROSITÉ ET PERMÉABILITÉ

La **POROSITÉ** est une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides (remplis des fluides liquides ou gazeux) et le volume total de la roche. Dans les réservoirs conventionnels cette valeur peut dépasser 20%, dans les réservoirs non conventionnels elle peut être inférieure à 1%.

La **PERMÉABILITÉ** d'une roche correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide de référence sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité s'exprime généralement en Darcy (D). Un darcy correspond à la perméabilité d'un corps continu et isotrope duquel un fluide de viscosité équivalente à celle de l'eau à 20°C s'écoule à une vitesse de 1 cm.s⁻¹ lorsqu'il est soumis à une pression de 1 atmosphère ce qui correspond à la dimension d'une surface (1 D = 0,97 x 10⁻¹² m²). Pour caractériser les aquifères proche de la surface, les hydrogéologues s'expriment généralement en Darcy, pour les réservoirs « conventionnels » les géologues pétroliers en milli-Darcy (10⁻³D). Dans le cas des hydrocarbures de roche-mère, la perméabilité peut être de l'ordre du micro (10⁻⁶D) ou du nano Darcy (10⁻⁹D).

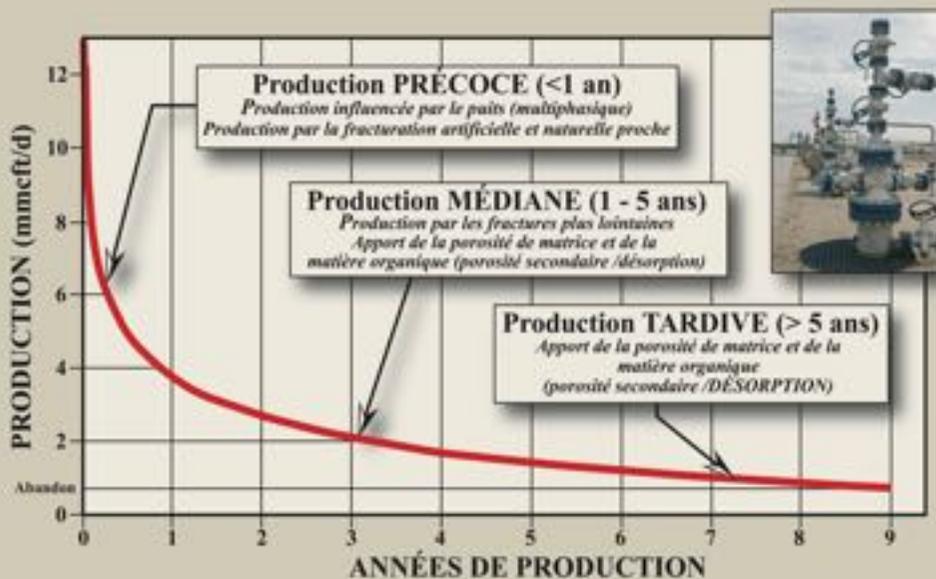
de la chimie et du plastique un avantage compétitif certain⁽⁷⁾.

Dow Chemicals prévoit en particulier d'investir au Texas dans une unité de production d'éthylène - produit à l'origine de nombreux plastiques. Fin 2012, la multinationale américaine avait déjà rouvert une installation en Louisiane, fermée depuis janvier 2009. Dans une étude réalisée avec le cabinet d'audit PricewaterhouseCoopers (PwC), en décembre 2011⁽⁸⁾, l'Association nationale des industriels tablait sur la création d'un million d'emplois d'ici à 2025. Cette production de gaz a aussi bouleversé le paysage énergétique américain. En 2007, les prévisions américaines prévoyaient que les USA seraient massivement importateurs de Gaz Naturel Liquéfié pour une valeur de l'ordre de 130 milliards de m³ par an à l'horizon 2035. En 2008, cette prévision était ramenée à 80 milliards de m³, en 2010 cette valeur tombait à 20 milliards de m³ et dès 2011, les USA ne devaient plus être importateurs de gaz. Actuellement, de nombreux projets d'exportation de GNL sont à l'étude. Plusieurs facteurs permettent d'expliquer ce succès :

→ Des bassins sédimentaires favorables à l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère déjà bien connus par les phases d'exploration et de production conventionnelles ;

→ Un coût de production faible, compris entre 3 et 8 dollars par MBtu, rendu possible par une très forte augmentation de la productivité des puits (70 à 180 millions de m³ en 2012, contre 30 en 2007) et ce malgré une augmentation du coût des forages (8 à 10 millions de dollars en 2012, contre 4 en 2008) ;

COURBE DE PRODUCTION TYPIQUE D'UN Puits D'HYDROCARBURES DE ROCHE-MÈRE



© IPSEN
7

→ Un tissu industriel pétrolier et parapétrolier très développé et très réactif ;
→ Un marché gazier déjà développé et une production gazière conventionnelle déclinante ;
→ Un droit minier favorable à l'exploitation des ressources compte tenu des importantes retombées économiques en découlant ;
→ Une volonté politique d'indépendance énergétique et de prix bas de l'énergie contribuant à la compétitivité de l'économie américaine.
Mais cet essor rapide de la production des hydrocarbures de roche-mère n'est pas sans susciter des interrogations quant à l'impact environnemental de cette exploitation.

DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX CERTAINS

Une des particularités de l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère réside dans leur profil de production montrant un taux de déclin particulièrement rapide (figure 7).
Ainsi, la moitié de la production totale cumulée de nombreux puits est réalisée au cours des deux premières années d'exploitation. Pour contrebalancer cette tendance, il est donc impératif de réaliser en permanence de nouveaux puits.
Une telle activité de forage, répétée sur de très nombreuses années si on veut maintenir ou augmenter la production, n'est pas sans impact environnemental. Plus que les techniques employées

7- Courbe de production typique d'un puits d'hydrocarbures de roche-mère. Le maximum de production a lieu durant les 2 premières années.

7- Typical production curve for a bedrock oil and gas well. Peak production occurs during the first two years.

- forages horizontaux et fracturation hydraulique -, c'est la multiplication des installations qui soulève des questions. Cette intense activité industrielle a montré qu'elle était source de nombreuses critiques, voire de conflits avec les populations locales. Les tensions se focalisent sur :
→ L'occupation des sols et l'impact visuel des installations ;
→ La gestion de l'eau. Le forage et plus encore la fracturation hydraulique nécessitent de grandes quantités d'eau. C'est aussi le cas pour le traitement des sables bitumineux ou des huiles lourdes. Une gestion raisonnée de l'eau doit non seulement éviter tout conflit d'usage de la ressource mais aussi

prendre en compte toutes les exigences environnementales concernant le traitement des effluents ;

→ Les risques de pollution des aquifères liés à la manipulation de produits chimiques en surface mais aussi à d'éventuelles fuites dans les installations souterraines pouvant entraîner la pollution des nappes phréatiques ;
→ L'émission de gaz à effet de serre. Les hydrocarbures non conventionnels restent des hydrocarbures et ils émettent, en brûlant, du CO₂. Les techniques d'extraction plus complexes produisent, elles aussi, des émanations de CO₂ ainsi que des risques d'émissions fugitives de gaz ;

→ La production d'hydrocarbures non conventionnels est généralement une activité industrielle lourde qui peut entraîner des nuisances.

Une des interrogations majeures concernant l'avenir de l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère c'est la capacité à produire ces hydrocarbures dans des conditions environnementales acceptables par les populations locales. Les demandes de plus en plus affirmées des populations locales font de la réduction de l'empreinte environnementale une des préoccupations majeures des exploitants.

Les solutions techniques existent. Elles nécessitent une optimisation globale de toutes les étapes d'exploration et de production :

→ Dès la phase d'exploration il est indispensable de définir les zones

présentant le meilleur potentiel (les « *sweetspots* »), la productivité des puits dans ces zones est importante on peut alors diminuer le nombre d'installations de production. Cette meilleure connaissance du sous-sol permet d'adapter l'architecture des puits, de définir les meilleures stratégies de fracturation artificielle et ainsi de diminuer les risques d'exploitation.

→ L'utilisation généralisée des forages horizontaux permet d'utiliser des « clusters » de puits (figure 8). À partir d'une seule plateforme de forage (« *pad* ») on peut forer jusqu'à 15 forages horizontaux diminuant ainsi le nombre d'unités de production.

La concentration de la production sur un nombre plus limité de sites permet de mettre en œuvre des techniques performantes de contrôle et de traitement des effluents liquides et gazeux, soit sur place, soit après acheminement par canalisation vers un centre de traitement adapté. De plus la surveillance par monitoring de la qualité des eaux des nappes phréatiques et de l'air en est grandement facilitée.

Ces « bonnes pratiques », qui ne sont en général que l'application des standards industriels de l'industrie pétrolière, doivent devenir une exigence. Cette préoccupation de sécurité et de diminution de l'empreinte environnementale de l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère est seule garante d'une exploitation pérenne de cette ressource.

LES HYDROCARBURES DE ROCHE-MÈRES : QUELLE PLACE DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE ?

Depuis quelques années, l'avenir des hydrocarbures non conventionnels se confond avec celui des hydrocarbures de roche-mère (pétrole et gaz de schiste) dont le développement récent et spectaculaire aux États-Unis suscite autant d'espoirs que d'interrogations.

DES RESSOURCES MONDIALES CONSIDÉRABLES

D'un point de vue strictement géologique, les hydrocarbures restés piégés dans les roches-mères représentent un volume considérable dont on commence juste à avoir une estimation. Même aux États-Unis, où des dizaines de milliers de puits ont déjà été forés, le volume des ressources restant à produire est sujet à de nombreux débats même si l'hypothèse d'une « bulle » très passagère ne semble plus d'actualité.

L'ampleur de la ressource dans les autres bassins sédimentaires commence tout juste à faire l'objet d'estimations dans certains pays.

→ L'Agence américaine d'information sur l'énergie (USEIA) estime en 2013 que les ressources récupérables mondiales de gaz de schiste s'élèvent à 204 Tcm⁽⁹⁾, valeur qu'il faut comparer aux 187 Tcm de réserves prouvées mondiales de gaz naturel⁽¹⁰⁾. Ce chiffre montre l'importance que pourrait avoir un développement mondial de cette ressource. Les pays ayant d'importantes ressources seraient :

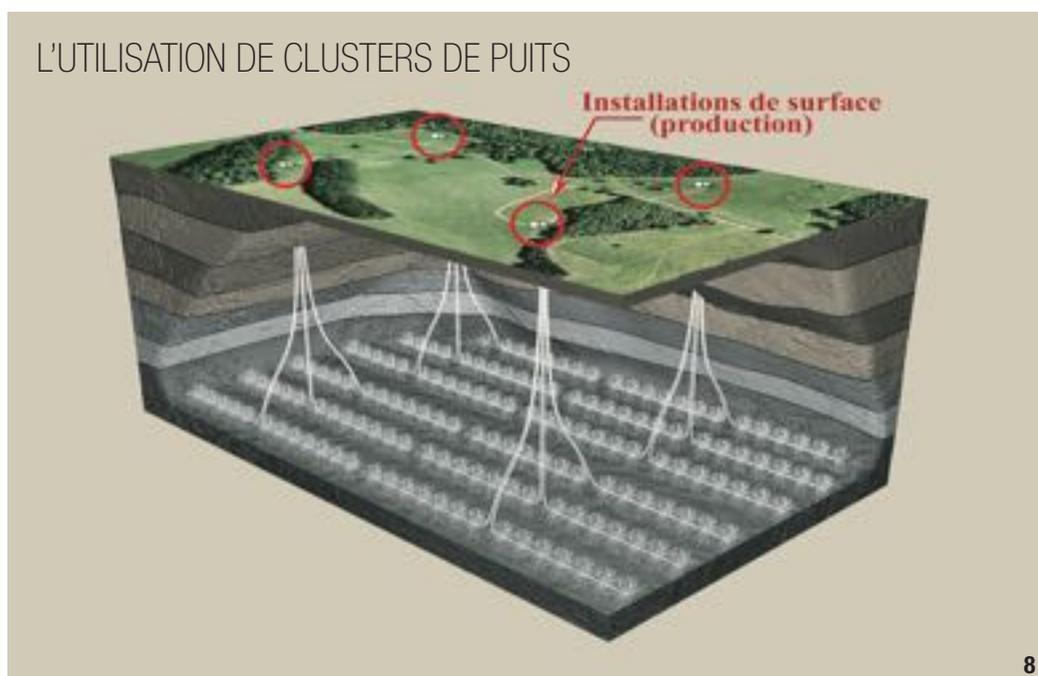
- La Chine avec 39,4 Tcm de ressources récupérables,
- L'Argentine avec 28,3 Tcm de ressources récupérables,
- L'Algérie avec 25,0 Tcm de ressources récupérables,
- Les USA avec 23,5 Tcm de ressources récupérables n'arriveraient donc qu'en 4^e position.

Cette répartition géographique des ressources en gaz de schiste est susceptible de modifier fortement les équilibres géopolitiques gaziers puisqu'actuellement la Russie, le Qatar et l'Iran représentent près de la moitié des réserves mondiales de gaz.

→ Concernant les pétroles de schiste, les premières estimations, encore plus récentes, sont loin de couvrir l'ensemble des bassins sédimentaires mondiaux. L'USEIA évalue en 2013 les ressources récupérables à 335 milliards de barils pour les bassins étudiés, valeur très inférieure aux 1 668 milliards de barils de réserves prouvées mondiales de pétrole mais nécessairement très sous-estimée dans la mesure où l'évaluation de grandes zones pétrolières comme le Moyen-Orient ou l'Asie centrale n'a pas encore été réalisée. Les pays ayant d'importantes ressources seraient :

- La Russie avec 75 milliards de barils récupérables,
- Les USA avec 58 milliards de barils récupérables,
- La Chine avec 32 milliards de barils récupérables,
- L'Argentine avec 27 milliards de barils récupérables.

En ce qui concerne le potentiel en hydrocarbures de roche-mère de la France, il est difficile d'avancer des chiffres, la phase spécifique d'exploration des hydrocarbures n'ayant pas été réalisée suite à l'interdiction de la fracturation hydraulique en juillet 2011. Cependant la connaissance des sys-



tèmes pétroliers des bassins sédimentaires français (figure 9) permet d'affirmer qu'il existe un potentiel en pétrole de schiste dans le bassin de Paris pouvant atteindre 1 à 2 milliards de barils récupérables, que la géologie du bassin du Sud-Est est favorable à la présence de gaz de schiste et que celle des bassins charbonniers de Lorraine et du Nord-Pas-de-Calais est favorable à la présence de gaz de houille.

MAIS UN AVENIR ENCORE INCERTAIN

Plusieurs causes peuvent être avancées pour expliquer que l'avenir des hydrocarbures de roche-mère reste encore incertain malgré une demande d'hydrocarbures en hausse durant les deux prochaines décennies. D'importantes ressources ainsi que des techniques d'exploitation ont montré, aux USA, leur efficacité et ont entraîné des conséquences économiques positives.

8- L'utilisation de clusters de puits permet à partir d'une seule installation, de drainer une surface de 5 à 7 km², limitant l'emprise au sol.

8- By using well clusters, it is possible, from a single installation, to cover an area of 5 to 7 sq.km, thus limiting the environmental footprint.

Un modèle américain difficile à transposer

Alors que les hydrocarbures non conventionnels ont pris une place importante dans l'approvisionnement

mondial en hydrocarbures qui devrait s'affirmer (le Venezuela est devenu le premier pays en termes de réserves prouvées grâce aux huiles lourdes de l'Orénoque devant l'Arabie Saoudite et le Canada riche en sables bitumineux), l'exploitation intensive des hydrocarbures de roche-mère n'a pour le moment eu lieu qu'aux USA.

Pour de nombreux observateurs, le modèle d'exploitation de ces hydrocarbures est difficilement transposable notamment en Europe où les densités de population sont beaucoup plus importantes et où le contexte pétrolier et parapétrolier ainsi que le cadre législatif sont très différents.

Les coûts d'exploitation devraient être plus élevés remettant en cause le modèle économique.

Des impacts environnementaux qui inquiètent les populations

L'impact environnemental de l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère est une réalité qui a une grande influence sur l'opinion publique de nombreux pays.

Au-delà d'un simple rejet local (« *Not In My Backyard* ») très présent, il s'agit aussi d'une réflexion plus globale sur la place des énergies fossiles dans le mix énergétique mondial.

Un mix énergétique mondial qui reste à définir

Tout le monde s'accorde à penser que la demande en énergie mondiale va croître au moins durant les 25 prochaines années du fait de l'augmentation de la population mondiale et du développement des pays émergents.

BARIL ET PIED CUBE...

L'industrie pétrolière n'utilise que très peu le Système International !

BARIL : Unité de volume correspondant à 159 litres. Cette unité est utilisée depuis les débuts de la production de pétrole. Il était transporté par bateaux dans des barils identiques à ceux dans lesquels on transportait le whisky. La petite histoire voudrait que l'on ait peint ces barils en bleu pour ne pas les confondre avec les autres barils d'où l'expression « bleu pétrole ». La production mondiale est de l'ordre de 86 millions de barils/j (soit 31,4 milliards de barils/an ou quasiment 5 milliards de m³).

PIED CUBE (cubic feet) : C'est l'unité couramment utilisée par les hydrocarbures gazeux. 1 pied cube = 0,02831 m³ (1 m³ = 35,3146 pied cube).

POTENTIEL FRANÇAIS



Chaque pays a cependant une vision particulière de l'énergie suivant des critères qui lui sont propres mais qu'on peut classer en 3 grandes catégories :

- Pour la plupart des pays émergents une énergie abondante, disponible et peu chère est synonyme de développement économique ;
- Pour d'autres pays, l'accès à une énergie extraite ou produite dans le pays est un gage d'indépendance énergétique et, si cette énergie n'est pas chère, un atout pour la compétitivité économique. C'est notamment le cas des USA.

Pour ces deux premières catégories de pays, une énergie produite localement, peu chère, est donc un atout certain. La prospection et le développement éventuel des hydrocarbures de roche-

9- Potentiel pétrolier et gazier des principaux bassins sédimentaires français.

9- Oil and gas potential of the main French sedimentary basins.

mère s'intègre bien dans leur mix énergétique.

→ Enfin pour de nombreux pays notamment les pays européens, le mix énergétique doit répondre aux critères de transition énergétique

compatibles avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Or, dans ces pays, il est communément admis que cette transition énergétique est incompatible avec la production d'énergies fossiles et donc avec le développement de nouveaux gisements d'hydrocarbures. Cette incompatibilité n'est d'ailleurs pas évidente, la transition énergétique ne signifiant pas, au moins dans un premier temps, la disparition totale de la consommation d'hydrocarbures. On voit d'ailleurs une inflexion de ces pays qui commencent à prendre en compte leur compétitivité économique et leur indépendance énergétique dans la définition de leur mix énergétique. La production d'énergie sera certainement le défi majeur du XXI^e siècle, c'est

le dénominateur commun de toutes les activités humaines.

Si le mix énergétique mondial reste à définir, il est évident que les modes de consommation et les modes de production devront être très différents de ce que nous avons connu durant ces dernières décennies. Une production raisonnée, avec une empreinte environnementale moindre et des risques maîtrisés dans la production des hydrocarbures non conventionnels, devrait permettre de bâtir une transition énergétique sereine. □

⁽¹⁾ World Energy Outlook 2012, International Energy Agency (IEA), 2012 (www.worldenergyoutlook.org).

⁽²⁾ Roland Vially, « Les hydrocarbures non conventionnels : évolution ou révolution ? », note de synthèse, *Panorama 2012*, IFP Energies nouvelles (www.ifpenergiesnouvelles.fr/publications/notes-de-synthese-panorama/panorama-2012).

⁽³⁾ Roland Vially, Guy Maisonnier et Thierry Rouaud, *Hydrocarbures de roche-mère. État des lieux*, Rapport IFPEN 62 729, 22 janvier 2013 (www.ifpenergiesnouvelles.fr/publications/etudes-disponibles).

⁽⁴⁾ Un mètre cube équivaut à 35,31 pieds cubes.

⁽⁵⁾ *British thermal unit*, unité anglo-saxonne d'énergie correspondant à la quantité de chaleur nécessaire pour élever une livre anglaise (environ 453,6 grammes) d'eau d'un degré Fahrenheit. Elle correspond à peu près à 1 054 joules.

⁽⁶⁾ Dans le bassin d'Eagle Ford, on produit à partir de la même formation du méthane, du gaz humide (propane, butane, éthane) et des hydrocarbures liquides.

⁽⁷⁾ Voir l'interview du PDG de Dow Chemicals, Andrew Liveris : « Dans la chimie, l'Europe devient la zone la moins compétitive du monde », *Le Monde*, 19 septembre 2013.

⁽⁸⁾ « Shale Gas: A Renaissance in US Manufacturing? », PricewaterhouseCoopers (PwC), décembre 2011 (www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/shale-gas.html).

⁽⁹⁾ 1 *Trillion cubic meter* (Tcm) = 10¹² mètres cubes. « Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries outside the United States », *U.S. Energy Information Administration*, juin 2013 (www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/).

⁽¹⁰⁾ BP Statistical Review of World Energy (June 2013) - <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical-review-of-world-energy-2013.pdf>

ABSTRACT

HYDROCARBON SOURCE ROCKS: A FUTURE TO BE BUILT

ROLAND VIALLY, IFPEN

By 2035, the proportion of oil and gas in the energy mix will decrease, but production will continue to increase (+14% for oil, +50% for gas). To meet this demand, conventional oil and gas production will not be sufficient. Shale oil and gas have remained trapped in the rock in which they were formed, the source rock. To produce these hydrocarbons from a non-porous, impervious rock, horizontal drilling and hydraulic fracturing ("fracking") must be used massively. Despite a larger environmental footprint than conventional production, the rapid development of this type of production in the United States has pushed down the price of gas and created a definite competitive advantage, especially for petrochemicals production. There are substantial resources worldwide, but the future for the exploitation of these resources is still uncertain. □

LOS HIDROCARBUROS DE ROCA MADRE: UN FUTURO POR CONSTRUIR

ROLAND VIALLY, IFPEN

Desde ahora hasta 2035, la proporción de los hidrocarburos en el mix energético se reducirá, pero la producción seguirá aumentando (+14% el petróleo y +50% el gas). Para responder a esta demanda, no bastará la producción de los hidrocarburos convencionales. Los hidrocarburos de roca madre (petróleo y gas de esquisto) son los hidrocarburos que quedaron atrapados en la roca en la que se formaron, la roca madre. Para producir estos hidrocarburos en una roca no porosa e impermeable hay que hacer un uso masivo de la perforación horizontal y la fracturación hidráulica. A pesar de una huella ambiental superior a una producción convencional, el desarrollo rápido de estas producciones en Estados Unidos ha permitido una reducción del precio del gas y una cierta ventaja competitiva, en particular para la petroquímica. Los recursos mundiales son considerables pero el futuro de la explotación de estos recursos es incierto. □

CAPTAGE GÉOTHERMIQUE EN PAROIS MOULÉES DE STATIONS DE MÉTRO

AUTEURS : BASTIEN BARDONESCHI, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, ECOME - JEAN-BAPTISTE BERNARD, GÉRANT, ECOME

LE PROCÉDÉ DE CAPTAGE GÉOTHERMIQUE EN STRUCTURES DE BÂTIMENTS ET OUVRAGES (PIEUX, RADIERS, PAROIS MOULÉES, TUNNELS) PERMET UNE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE CES INSTALLATIONS. PLUSIEURS PROJETS, SOUS L'IMPULSION DE LA RATP, SONT EN COURS DE RÉALISATION SUR LES LIGNES 12 ET 14, PERMETTANT DE COUVRIR LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DES STATIONS DE MÉTRO (CHAUFFAGE ET RAFRAÎCHISSEMENT DE LOCAUX) OU D'ALIMENTER DES BÂTIMENTS SITUÉS À PROXIMITÉ DES STATIONS. UNE SOLUTION INTÉRESSANTE À ENVISAGER DANS LE CADRE DES FUTURES STATIONS DU GRAND PARIS.



© GÉOTHERMIE PROFESSIONNELLE

PRINCIPE DE LA PRODUCTION GÉOTHERMIQUE

Le principe de captage géothermique repose sur la présence d'une « boucle fermée » pour laquelle la source énergétique est constituée par le sous-sol environnant. Le fluide caloporteur circulant dans les tubes de la « boucle fermée » a alors pour rôle de récupérer

l'énergie du sous-sol ou de lui en transmettre. Il est ainsi possible de chauffer ou refroidir des bâtiments avec l'énergie collectée (figure 2).

Le rafraîchissement et/ou le chauffage de la station nécessite alors l'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC), qui a pour fonction de procéder à l'échange thermique entre le circuit primaire

1- Cage équipée de tubes de captage.

1- Cage fitted with capture tubes.

(réseaux géothermiques) et le circuit secondaire (réseaux de distribution de l'énergie). Néanmoins, en mode froid, un fonctionnement en free-cooling est envisageable sur ce type d'installation. L'action mécanique de la pompe à chaleur n'est alors pas utilisée et l'échange entre les deux réseaux se fait naturellement.

PRINCIPE DU CAPTAGE ÉNERGÉTIQUE SUR PAROIS MOULÉES

Ce procédé est largement éprouvé puisque les premières réalisations remontent à 35 ans, en Autriche.

Il est développé en France par Ecome à travers un partenariat exclusif avec la société autrichienne à l'origine de cette technologie.

Ecome s'interface avec les maîtres d'ouvrage, maîtrises d'œuvre et entreprises afin d'apporter leur expertise de géothermicien pour la valorisation énergétique des projets et garantir la performance des réalisations.

La solution consiste en la mise en place de tubes dans les cages d'armature des parois moules (figure 3). Ces réseaux permettent alors la circulation d'un fluide caloporteur, vecteur d'énergie entre le terrain et la pompe à chaleur.

En fonction du mode de fonctionnement du captage géothermique, en mode chaud et/ou froid, les zones équipées des parois moules seront différentes (figure 4). Cette détermination des zones se fait au moment du dimensionnement.

Les différents réseaux de captage sont collectés sous le radier ou au dessus du radier, selon les cas. Ils sont rassemblés via une nourrice. Les nourrices sont ensuite connectées à la pompe à chaleur qui va opérer l'échange thermique. Des équipements techniques tels que des pompes, des compteurs d'énergie et autres organes hydrauliques sont également mis en place.

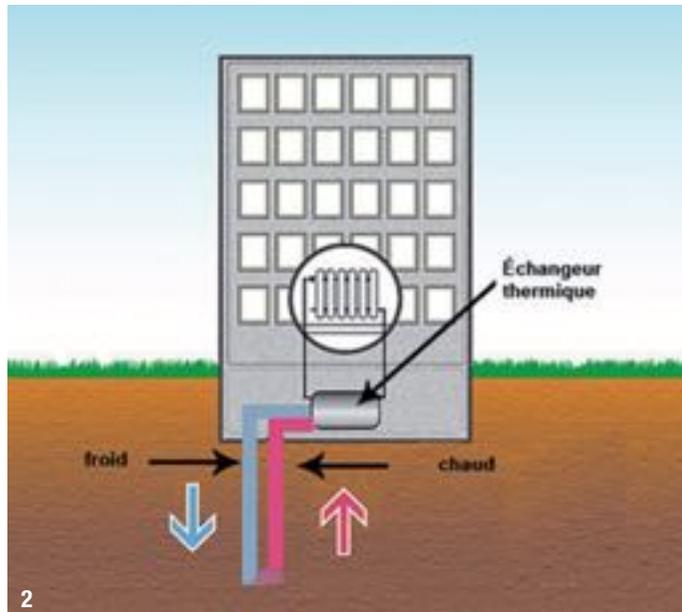
La mise en place de ce type de captage énergétique est en cours de réalisation sur plusieurs nouvelles stations du métro parisien (prolongements des lignes 12 et 14).

L'EXEMPLE DU PROLONGEMENT DES LIGNES 12 ET 14

Trois stations vont être équipées : station Mairie d'Aubervilliers (ligne 12), stations Porte de Clichy et Mairie de Saint-Ouen (ligne 14), sous maîtrise d'ouvrage RATP.

DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME

Le captage géothermique est conçu pour satisfaire les besoins en chauffage et/ou rafraîchissement des locaux de la station. Suivant les surfaces disponibles en station, la couverture énergétique d'ouvrages situés à proximité de la station (bâtiments tertiaires ou de logements, centres commerciaux) est envisageable.



© ECOMÉ

2- Captage géothermique.

3- Cage d'armature de la paroi moulée équipée de tubes géothermiques.

2- Capturing geothermal power.

3- Diaphragm-wall reinforcement cage fitted with geothermal tubes.

Le système interagissant avec le sol, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques thermiques de celui-ci pour les zones de captage considérées. Pour cela, un test de réponse thermique (TRT) est réalisé (figure 5). Cette étape permet de mesurer les caractéristiques thermiques du sous-sol in situ, qui sont indispensables pour le dimensionnement du système et la garantie de la performance à long terme de l'installation.

Les caractéristiques déterminées lors du TRT sont la température et la con-

ductivité thermique du sous-sol sur la hauteur considérée.

Une paroi moulée est également caractérisée par sa résistance thermique, qui permet de quantifier l'écart de température entre le fluide caloporteur et le terrain sur son pourtour, en régime stationnaire et pour une puissance transférée connue. En d'autres termes, l'extraction d'une puissance thermique crée une différence de température entre le fluide et le terrain, indépendamment du fait d'avoir des conditions géologiques et hydrogéologiques favorables ou non. La résistance thermique d'une paroi moulée dépend notamment de ses dimensions, du nombre et de l'arrangement spatial des tubes, du régime d'écoulement du fluide caloporteur, de la conductivité thermique du béton.

Le dimensionnement du captage géothermique permet principalement de déterminer la surface de captage nécessaire à équiper en réseaux géothermiques dans les parois moules. Cette surface doit répondre aux besoins énergétiques à couvrir et ceci en fonction des caractéristiques des besoins (chaud ; froid ; chaud + froid et ratio chaud/froid), des spécificités de la paroi et du sous-sol environnant, des conditions de températures dans la station et des conditions au secondaire de la PAC. Le débit de fluide caloporteur dans les réseaux géothermiques est déterminé de manière à ce que le régime d'écoulement soit turbulent afin d'augmenter l'échange thermique. Le dimensionnement hydraulique des réseaux doit être réalisé de manière à ne pas avoir des pertes de charges trop importantes, ce qui conduirait à un surdimensionnement des pompes de circulation.

Les simulations thermiques sont réalisées sur l'ensemble de la surface de captage considéré en fonction du mode de fonctionnement chaud et/ou froid. Les performances du système sont basées sur un choix par la maîtrise d'ouvrage d'un pourcentage de couverture de la puissance maximale à satisfaire sur les ouvrages concernés.

MODE CONSTRUCTIF DE LA STATION

Le choix du soutènement dépend du contexte géotechnique et de la profondeur du projet. Dans le cas où la paroi moulée est choisie comme ouvrage définitif, le captage géothermique peut être mis en place. La mise en œuvre du procédé géothermique suit alors le mode constructif de la station de métro et des interventions sont prévues aux différentes phases du projet.

© GÉOTHERMIE PROFESSIONNELLE



3

CONTRAINTES ET AVANTAGES DU PROCÉDÉ GÉOTHERMIQUE

Les contraintes techniques principales de la mise en œuvre d'un captage géothermique en parois moulées concernent le mode constructif des parois, le planning d'exécution, le phasage et la coordination avec les autres corps d'état.

Les avantages résident dans la pérennité du système (supérieure à 50 ans pour le système de captage), dans la faible maintenance du système et dans la possibilité de « sécuriser » la production du système à 100% avec mise en œuvre d'une installation de relève (chaudière gaz, électricité).

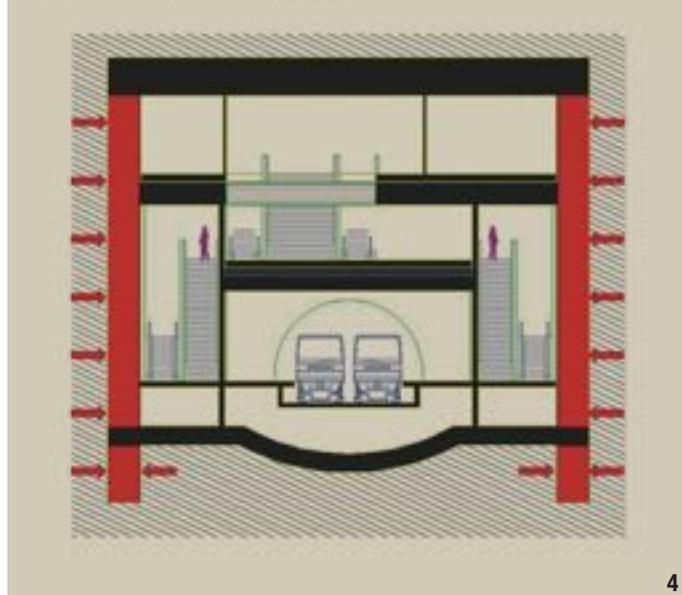
Le principal avantage de ce procédé est d'utiliser directement la structure de la station comme échangeur. Cela donne une valeur ajoutée à la structure qui sert de captage énergétique en plus de sa fonction structurelle.

Aucune dalle ou autre paroi supplémentaire n'est nécessaire pour le captage énergétique, ce qui n'induit pas un coût supplémentaire sur la mise en œuvre.

MISE EN ŒUVRE TECHNIQUE DU SYSTÈME DE CAPTAGE

Suite au dimensionnement réalisé en phase d'exécution, les linéaires

PRINCIPE DE CAPTAGE GÉOTHERMIQUE SUR PAROIS MOULÉES



4
© ECOMIE

4- Principe de captage géothermique sur parois moulées.
5- Réalisation d'un TRT.
6- Raboutage de tubes géothermiques.

4- Technique for capturing geothermal power on diaphragm walls.
5- Execution of a TRT.
6- Butt joining of geothermal tubes.

de tubes et les cages d'armatures concernées par le captage sont connus. L'équipement des cages d'armature est réalisé sur le chantier ou à l'usine du fabricant de cages.

Les tubes de captage sont fixés à l'aide d'attaches métalliques à la structure

métallique des parois moulées, tels que les filants et cadres (figure 1). Les réseaux géothermiques présents sur la périphérie des cages procèdent à plusieurs allers-retours sur la longueur équipée.

Suivant le cheminement et la longueur

des réseaux géothermiques dans la cage, il peut être nécessaire de procéder à un raboutage. Le raboutage consiste à assembler deux réseaux à l'aide d'éléments de raccordement. Lors de la descente des cages d'armature dans les tranchées de parois



5



6

© GÉOTHERMIE PROFESSIONNELLE

moulées, des rabouages de réseaux géothermiques entre deux éléments de cage sont envisageables. Les cages sont alors retenues au niveau du sol afin de procéder aux opérations de raccordement (figure 6). Cette opération est brève et elle est réalisée en relation avec les fondeurs.

La récupération des tubes géothermiques dans la paroi, à l'endroit prévu à cet effet dans la station de métro, nécessite d'aménager une sortie des tubes de la paroi moulée.

La récupération des tubes est opérée une fois que le décaissage de la station est réalisé.

Cette étape peut alors être réalisée plusieurs mois après la mise en œuvre des parois moulées, où les tubes géothermiques sont ainsi en attente. Lorsque que les tubes géothermiques en parois ont été mis à jour, des liaisons horizontales permettent de les raccorder aux collecteurs géothermiques. Un calorifugeage des réseaux est mis en œuvre afin de limiter les pertes thermiques. Les collecteurs géothermiques (figure 7) peuvent recevoir de 2 à 20 réseaux et ont pour fonction de centraliser le flux hydraulique vers la pompe à chaleur.

La dernière étape de la mise en œuvre de ce procédé de captage consiste au remplissage et aux purges des circuits géothermiques.

Les collecteurs sont par la suite laissés en attente avant leur raccordement à la pompe à chaleur par le lot en charge du Chauffage Ventilation Climatisation (CVC).

EXEMPLE DE LA STATION DE MÉTRO « PORTE DE CLICHY » DE LA LIGNE 14

La ligne 14 de métro parisien relie la station « Saint-Lazare » à la station « Olympiades » et va être prolongée côté « Saint-Lazare » avec 4 stations de prévues, dont la station « Porte de Clichy ». La mise en place d'un captage d'éner-



7 © GÉOTHERMIE PROFESSIONNELLE

gie géothermique couplé à une pompe à chaleur dans les parois moulées, d'une hauteur totale de 48 mètres, est prévue dans le cadre de la valorisation énergétique du réseau RATP. Ce captage énergétique a pour objectif le chauffage et le rafraîchissement des locaux d'exploitation (bureaux, vestiaires, sanitaires) et techniques de la station.

La surface de captage géothermique prévue est de 3 724 m², située en partie inférieure au radier et au niveau du radier jusqu'au sous-quai, et ceci sur les côtés longitudinaux de la station. Les tubes en polyéthylène seront remplis par de l'eau glycolée (fluide caloporteur) afin d'éviter les risques de gel des réseaux géothermiques. La récupération des tubes géothermiques est réalisée au niveau du

sous quai de la station, où les liaisons horizontales et les collecteurs géothermiques sont également disposés. Un local au sein de la station est dédié à l'installation de la pompe à chaleur. La réalisation des travaux aura lieu entre les derniers trimestres de 2014 et 2017. Les interventions relatives à la géothermie se concentreront au début et en fin de mise en œuvre de la station.

PROCÉDÉ ADAPTÉ À DIFFÉRENTS TYPES D'OUVRAGES EN PAROIS MOULÉES

Ce type de procédé utilisé pour le chauffage et/ou le rafraîchissement peut être appliqué à tout type d'ouvrage dont le choix de soutènement est la paroi moulée, aux pieux de fondation et aux radiers, ce qui est un des atouts non négligeables de cette technologie. S'ajoute à cela l'avantage d'utiliser des structures indispensables à la construction de l'ouvrage comme source d'énergie.

Ce procédé est déjà appliqué sur différents types d'ouvrages notamment en Autriche, Angleterre, Allemagne, Suisse, Canada ou en Chine, sur des centres commerciaux, des parkings, des bâtiments de bureaux ou de logements, des stations de métro, ou des hôpitaux. □

7- Collecteurs géothermiques.

7- Geothermal power collectors.

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : RATP

MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra

EXPERT GÉOTHERMIQUE : Ecome

MISE EN PLACE DU CAPTAGE GÉOTHERMIQUE : Géothermie Professionnelle

RÉALISATION DES PAROIS MOULÉES :

- Ligne 14 - Mairie de Saint Ouen : Soletanche Bachy France
- Ligne 14 - Porte de Clichy : Eiffage
- Ligne 12 - Mairie d'Aubervilliers : Botte Fondations

ABSTRACT

CAPTURING DIAPHRAGM-WALL GEOTHERMAL POWER IN METRO STATIONS

BASTIEN BARDONESCHI, ECOMÉ - JEAN-BAPTISTE BERNARD, ECOMÉ

The process of capturing diaphragm-wall geothermal power, coupled to a heat pump, can cover energy needs for the heating and/or cooling of metro stations or neighbouring buildings. The engineering structure is in this case an energy asset. This environmentally-friendly technology, extensively tried and tested, notably in Austria, is developing in France and is suitable for all types of special foundation and infrastructure works. □

CAPTACIÓN GEOTÉRMICA EN PAREDES MOLDEADAS DE ESTACIONES DE METRO

BASTIEN BARDONESCHI, ECOMÉ - JEAN-BAPTISTE BERNARD, ECOMÉ

El procedimiento de captación geotérmica en paredes moldeadas, acoplado a una bomba a calor, permite cubrir las necesidades energéticas de calefacción y/o refrigeración de las estaciones de metro o de los edificios cercanos. La estructura de la obra es una ventaja energética. Esta tecnología medioambiental ampliamente probada, particularmente en Austria, se desarrolla en Francia y se adapta a todo tipo de obra de cimentaciones especiales o de infraestructura. □



1- Levage du rotor,
parc éolien des
Chemin d'Ablis.

1- Lifting the rotor,
Chemin d'Ablis
wind farm.

© EDF ÉNERGIES NOUVELLES

CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES PARCS ÉOLIENS, DU TERRESTRE À L'OFFSHORE

AUTEURS : PASCALE DE MUYNCK ET YVES ROLLAND, EDF ÉNERGIES NOUVELLES

RÉALISER UN PARC ÉOLIEN NÉCESSITE LA COORDINATION D'INTERVENANTS D'HORIZONS DIVERS, DU GÉNIE CIVIL AUX TRAVAUX ÉLECTRIQUES EN PASSANT PAR LE TRANSPORT ET LE MONTAGE DE COLIS LOURDS. AVEC L'AUGMENTATION DE LA TAILLE DES PARCS ET DES MACHINES, CHACUN DE CES SECTEURS A DÛ CONCEVOIR ET METTRE EN ŒUVRE DES MÉTHODES ET DES TECHNOLOGIES PERMETTANT D'AMÉLIORER DE MANIÈRE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE LA CONSTRUCTION DES PROJETS. AUJOURD'HUI, LE PASSAGE DU TERRESTRE À L'OFFSHORE DEMANDE UN NOUVEL EFFORT DE LA PART DES CONSTRUCTEURS POUR RENDRE POSSIBLE LA MISE À PROFIT DU VENT MARITIME POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ.

CROISSANCE DE LA PUISSANCE ÉOLIENNE INSTALLÉE EN FRANCE

6 GW de puissance éolienne raccordée en France en 2010, 8,1 GW en 2013 et 25 GW prévus à l'horizon 2020 dont 6 GW offshore. Les accords de Grenelle ont donné le rythme au développement et à la construction de parcs éoliens pour la décennie en cours. À l'instar de toute industrie, celle de l'éolien se doit, pour atteindre son objectif, de repousser les limites de ses technologies. Cela commence par l'aérogénérateur, qui impacte l'ensemble des composants des unités de production, des voies d'accès aux tours en passant par les fondations et les réseaux électriques. Le potentiel de vent est recherché toujours plus loin et plus haut (figures 3 & 4).

CONSTRUCTION DES PARCS ÉOLIENS TERRESTRES

Depuis l'industrialisation de la production d'énergie électrique éolienne, les technologies n'ont cessé d'évoluer dans l'objectif d'une meilleure efficacité énergétique, d'abord dans leur concept, puis dans la taille des outils de production (figure 5).

Aujourd'hui, la filière éolienne terrestre tend vers un consensus de machines de puissance au moins égale à 3 MW et de hauteur maximale en haut de pale de 200 m et plus. Avec l'évolution de la puissance des machines, la hauteur des mâts et des pales ainsi



2
© C-POWER

2- Fondation jacket.

2- Jacket foundation.

que les volumes des fondations ont également augmenté. Ce qui induit une complexité, tant logistique au regard de la contrainte sur la taille des convois que dans la conception des tours et de leurs systèmes d'ancrage aux fondations.

DÉFI LOGISTIQUE

Structurellement, un aérogénérateur se compose d'une fondation, d'un mât acier, béton ou hybride transporté par sections et assemblé sur site, d'une nacelle au sein de laquelle est logée la génératrice et d'un rotor constitué de 3 pales.

Pour assurer l'acheminement de l'ensemble des composants des parcs très souvent situés en zone isolée, il est nécessaire de procéder à des aménagements préliminaires : renforcement des voies existantes, réalisation de pistes dimensionnées pour assurer la traficabilité de convois pouvant atteindre 140 t et construction de plates-formes d'environ 1 000 m² dédiées au stockage des éléments, au montage et aux opérations de grues de capacité allant jusque 800 t. Pour les parcs situés en zones montagneuses, les machines sont positionnées en crête afin de profiter des vents les plus favorables. La réalisation d'études géologiques et géotechniques avancées pour le dimensionnement de pistes d'accès lourdes à flancs de versants est alors généralement nécessaire (figure 6).

CONSTRUCTION DES FONDATIONS, UNE PROBLÉMATIQUE DE TEMPS

À l'heure actuelle, les fondations des machines les plus couramment installées représentent des volumes de fondation de l'ordre de 400 à 500 m³ de béton, coulé en une passe. ▷

Une contrainte technique forte, exigeant une extrême fiabilité des centrales à béton et des camions de transport afin d'éviter toute rupture dans le bétonnage et donc la création de joints froids.

La problématique est d'autant plus forte que les parcs éoliens sont très souvent éloignés des centrales de production. Sur des sites isolés, EDF EN Canada a eu recours à des centrales à béton mobiles et a dû procéder à des études approfondies de formulation du béton pour répondre aux conditions climatiques extrêmes. La mise en place de membranes et de tubes chauffants a été nécessaire en période hivernale pour assurer la cure du béton dans des conditions acceptables.

Par ailleurs, si, en moyenne, le taux de ferrailage des fondations d'éolienne est d'environ 100 kg/m³, les fortes concentrations d'aciers au droit de l'ancrage des tours peuvent rendre difficile la mise en place des armatures et du béton dans des conditions d'exécution acceptables. Là encore, la composition du béton a dû être adaptée pour assurer une continuité de la masse de béton. Cela est vrai en particulier au droit du point critique de l'ancrage qui est assuré soit par une virole en acier soit par une cage de boulons post-contraints.

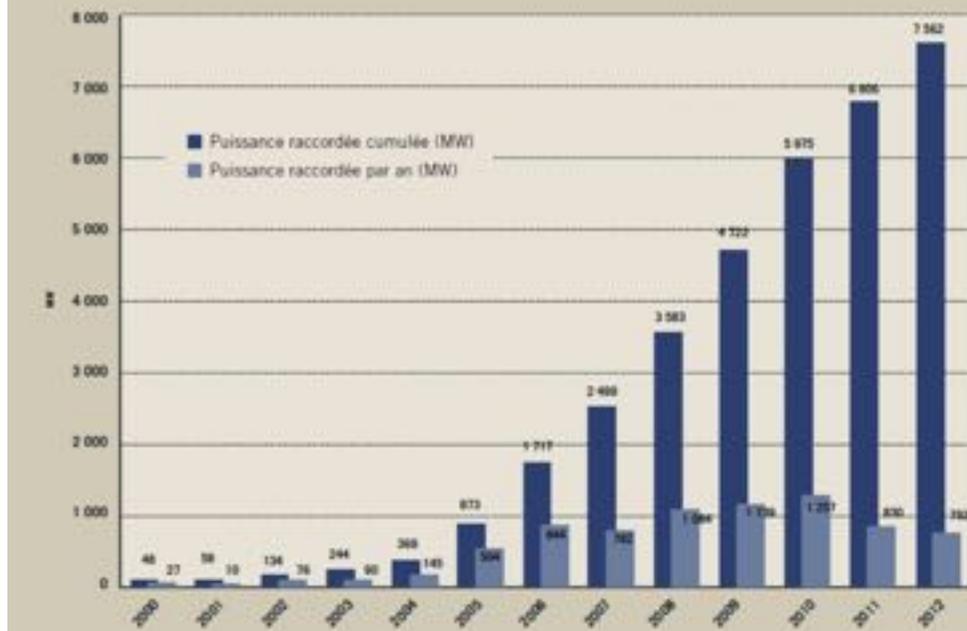
Au total, 3 à 4 semaines sont nécessaires pour l'excavation, la mise en place du ferrailage, des coffrages et de l'ancrage de la tour, le bétonnage et le remblaiement de la fondation.

Les conditions de sol peuvent par ailleurs justifier la réalisation de fondations sur pieux ou, de plus en plus couramment, celle de renforcements de sol par colonne rigide ou soil-mixing. Une attention particulière doit alors être portée par le concepteur au caractère cyclique des chargements et à l'adéquation de la solution de traitement retenue au regard de cette contrainte (figure 7).

RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE FONDATIONS D'ÉOLIENNES, ÉLABORÉES PAR LE COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE (CFMS)

Depuis le 1^{er} octobre 2008, les éoliennes terrestres dont l'axe de rotation est situé à plus de 12 m de hauteur sont, au titre de la loi Spinetta, soumises au contrôle technique obligatoire et font l'objet d'une responsabilité décennale du constructeur. Si les turbines en elles-mêmes sont couvertes

ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE ÉOLIENNE RACCORDÉE EN FRANCE (France métropolitaine et DOM)



3

© SCES, MAI 2013

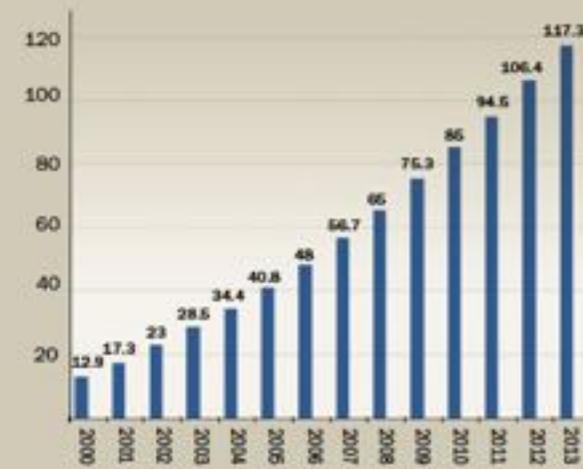
3- Évolution de la puissance éolienne raccordée en France.

4- Évolution de la puissance éolienne installée dans l'UE.

3- Growth in wind power connected to the grid in France.

4- Growth in installed wind-power capacity in the EU.

ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE ÉOLIENNE installée dans l'UE



4

© EWEA, FÉVRIER 2014

par un certificat de conception et de fabrication fourni par les constructeurs, un vide normatif sur le dimensionnement et la conception de leurs fondations a rapidement été identifié par les concepteurs, entreprises et bureaux de contrôle.

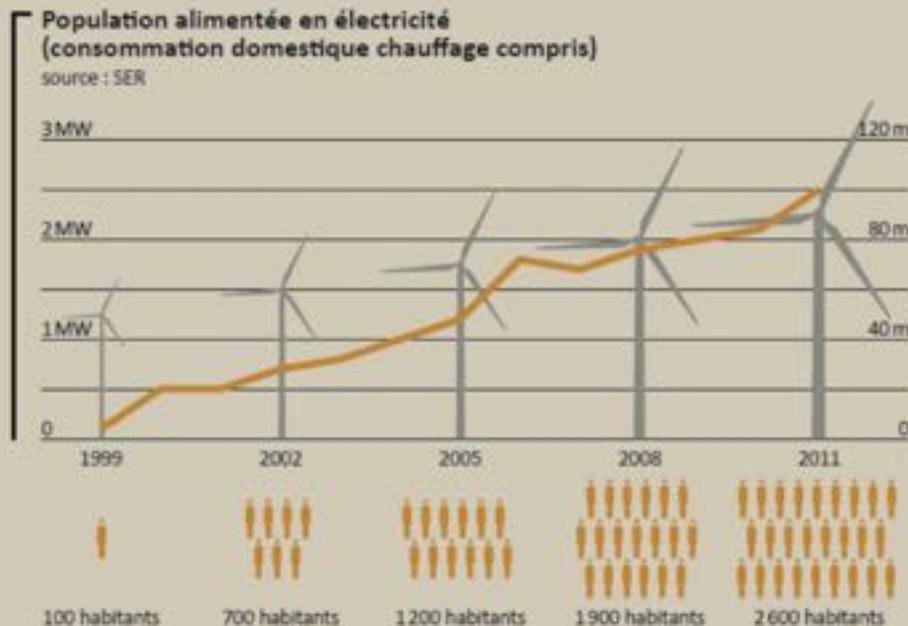
Traditionnellement nord-européenne, l'industrie de l'éolien terrestre ou offshore s'est d'abord structurée du point de vue de la conception, en Allemagne et au Danemark. Des travaux de normalisation y ont été amorcés et ont abouti à des recommandations rédigées respectivement par les organismes DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) et

le DNV (Det Norske Veritas). Sur ce constat, le CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols) a été à l'initiative d'un groupe de travail missionné pour établir des règles de conception et d'exécution des fondations d'éoliennes terrestres en cohérence avec le référentiel normatif français. Les dimensions de la structure ainsi que les spécificités du chargement cyclique amené par les aérogénérateurs ont justifié le classement de ces ouvrages dans la catégorie géotechnique 3 « Ouvrages qui devraient normalement faire appel à des dispositions ou règles alternatives à celle de cette norme » (NFEN

1997-1, 2005, Section 2.1) et légitimé l'élaboration de guides de conception à l'usage de l'ensemble des acteurs de la construction.

Les efforts du groupe de travail se sont en premier lieu portés sur la compréhension des chargements fournis par les concepteurs et retenus comme données d'entrée pour le dimensionnement des fondations. Ces données de chargement traduisent d'une part les efforts extrêmes engendrés par des vents violents et d'autre part les chargements cycliques engendrés par la rotation des pales. Pour ce faire, l'ensemble des conditions de vent associées aux

PUISSANCE ET TAILLE MOYENNE DES ÉOLIENNES INSTALLÉES



5

différentes configurations de l'éolienne au cours de sa durée de vie est analysé par le concepteur, permettant l'établissement des charges de conception de l'aérogénérateur en lui-même et de sa fondation aux ELS, ELF et ELU.

Le référentiel français en vigueur, qu'il soit normatif ou représentatif de l'état de l'art, a par ailleurs été analysé au regard des spécificités des ouvrages visés, de manière à permettre l'édiction de recommandations relatives aux programmes de reconnaissance de sol, aux fondations - superficielles et profondes -, et aux procédés de traitements de sol.

5- Puissance et taille moyenne des éoliennes installées.

6- Parc éolien d'Imerovigli, Grèce.

5- Average power and size of installed wind turbines.

6- Imerovigli wind farm, Greece.

Le guide de « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes » est ainsi paru en juillet 2011 (<http://www.cfms-sols.org/sites/default/files/recommandations/eoliennes.pdf>).

Une démarche identique a été initiée en 2013 pour les fondations d'éoliennes offshore, s'appuyant sur la connaissance acquise des chargements d'éoliennes et sur les référentiels internationaux couramment usités dans l'industrie parapétrolière.

Elle devrait amener à la parution de recommandations à la fin du premier semestre 2015.

MONTAGE DE L'AÉROGÉNÉRATEUR, UNE PROBLÉMATIQUE DE TEMPS

Le montage d'un aérogénérateur (mât, nacelle et pales) est réalisé en 2 à 3 jours. Au moment de cette opération, les conditions de vent sont limitées à une vitesse de 7 à 8 m/s, seuil au-delà duquel la sécurité des hommes et du matériel est considérée comme critique et doit faire l'objet d'analyses plus poussées. Préalablement aux opérations, les conditions météorologiques sont donc analysées pour assurer une période suffisante pour le montage des tours et des mesures sont réalisées en continu tout au long des travaux d'installation. Les sections de tour sont successivement levées et assemblées par boulonnage de manière à satisfaire des tolérances d'installations fixées, en termes de défaut de verticalité, à 3 mm/m en moyenne (figure 1).

Avec l'évolution de la taille des rotors, les sections de tour ont très largement augmenté, jusqu'à atteindre la taille critique au-delà de laquelle le transport terrestre n'était plus possible. À cette contrainte, les turbiniéristes et génie-civilistes ont répondu par des solutions de tours en béton soit amenées par modules assemblés et fixés par post-contrainte sur site, soit construites sur place avec des systèmes de coffrages glissants (figure 8).

Quelques chiffres :

- Convois pour l'approvisionnement des aciers : 4 à 5 par machine ;
- Toupies béton : 60 à 70 par machine ;
- Construction d'une fondation : 20 à 30 jours + 28 jours de séchage ;
- Capacité des grues : 600 à 800 t ;
- Montage de la structure primaire (Mât, nacelle et pales) : 2 à 3 jours par éolienne.

CONSTRUCTION DE PARCS ÉOLIENS OFFSHORE

Si le potentiel éolien offshore est inépuisable, la mise à profit de la ressource s'avère quant à elle complexe du fait du transport et de l'installation d'éléments lourds dans un environnement contraignant en raison des profondeurs d'eau, des conditions de mer et de l'éloignement par rapport aux côtes (figures 9 & 10).

Le premier parc éolien offshore a été construit en 1991 à Vindeby (Danemark), jouissant d'une bathymétrie faible et d'états de mer relativement favorables. Toutefois, à l'instar de l'éolien terrestre, l'offshore voit progressivement les parcs s'éloigner des côtes ▷



6



© KELLER FONDATIONS SPÉCIALES



© ENERCON

et les machines gagner en puissance et en taille ; face à cela, les concepteurs bénéficient de la compétence acquise par la filière dans le développement de machines adaptées à des conditions de vents forts mais plus réguliers qu'à terre où la turbulence a un impact très défavorable sur la fatigue des ouvrages.

Si la sélection du principe de fondation des éoliennes est en grande partie régie par les conditions de sol et de mer et la bathymétrie, il n'est pas rare que la contrainte liée à son installation gouverne au final le choix.

Les méthodes d'installation doivent par ailleurs être adaptées pour chaque composant du parc selon son poids et ses dimensions mais également en fonction de la disponibilité des navires d'installation, des capacités portuaires, de la distance du parc à la côte et de la logistique générale.

Après avoir contribué à la réalisation des 2 phases du projet Thornton Bank finalisé en 2012, EDF Renewable (EDF Energy + EDT Energies Nouvelles) a mis en service le parc éolien offshore de Teeside mi 2013. Pour la construction de ces projets, les 3 types de fondations les plus courants ont été mis en œuvre : GBS -Gravity Base Structure- (embase gravitaire en béton), jackets (structure métallique treillis) et monopieux (tube acier).

CONSTRUCTION ET INSTALLATION DES EMBASES GRAVITAIRES (GBS)

Les embases gravitaires construites pour le projet de Thornton Bank se composent de 3 parties principales en béton : le radier d'environ 24 m de diamètre, le cône de transition et la section

tubulaire, ces 2 dernières bénéficient d'un système de post-contrainte afin d'assurer la reprise des efforts horizontaux et moments associés. L'ensemble atteint une hauteur de l'ordre de 45 m (figure 11).

Après réalisation du radier, le cône ainsi que la section supérieure tubulaire ont été construits par coffrage glissant. En moyenne, une centaine de jours a été nécessaire par structure pour leur réalisation en série à terre. Les GBS ont ensuite été transportées bord à quai par transporteur multi-roues d'où elles ont été chargées à bord du bateau d'instal-

7- Parc éolien de Pannecé.

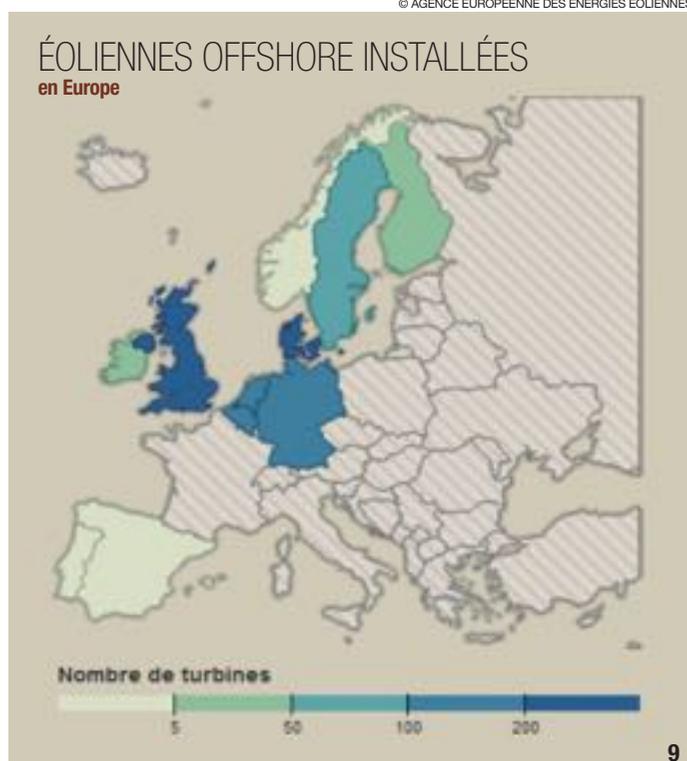
8- Montage d'une tour béton.

9- Éoliennes offshore installées en Europe.

7- Pannecé wind farm.

8- Erection of a concrete tower.

9- Offshore wind turbines installed in Europe.



9

lation capable d'assurer le levage des 3 000 t de l'ouvrage (figure 13).

La séquence d'installation des fondations gravitaires commence par la préparation du sol et la mise en place de l'assise de la fondation.

La planéité de celle-ci et sa constitution sont des éléments essentiels pour assurer le bon positionnement et la verticalité de la fondation sur l'ensemble de sa durée de vie. Son dimensionnement est réalisé sur la base des conditions de sol (bathymétrie et caractéristiques géotechniques) et de mer (houle et courant). La mise en œuvre se fait à l'aide d'un navire de type « fall pipe vessel » (navires spécifiques pour installer des matériaux sur le sol marin) qui déverse directement sur le fond les roches et granulats.

La surface au sol à préparer pour une fondation peut atteindre 4 000 m² et la durée des travaux environ cinq jours par fondation. Sous certaines conditions, il peut s'avérer nécessaire de réaliser une opération de dragage pour, par exemple, atteindre en profondeur une couche de sol de portance suffisante (figure 12).

Une fois la préparation de sol effectuée, la fondation est transportée par bateau, flottaison ou semi-flottaison depuis la zone de construction jusqu'au site d'installation.

Pour le projet Thornton Bank, le poids des fondations a été intégralement levé puis supporté par le bateau de transport. Néanmoins, sur la base de l'expérience acquise par les génie-civilistes pour la fabrication et l'installation des caissons de digue et afin de s'affranchir de l'utilisation de moyens d'installation lourds, des solutions alternatives de mise à l'eau par portique, berre ou barge semi-submersible et de transport par catamaran ou en flottaison sont en cours de développement pour être utilisées sur le parc éolien de Fécamp (figures 14 et 15).

Dans le cas d'un transport par flottaison complète ou partielle, une structure flottante additionnelle peut être utilisée pendant le remorquage afin d'accroître la stabilité et la flottabilité.

Le remorquage de l'ensemble sera alors effectué par deux remorqueurs de haute mer : le premier positionné devant la fondation tirera l'attelage, le second étant en secours à l'arrière. Les remorqueurs qui seront utilisés pour ces opérations devront avoir respectivement des puissances d'au moins 5 000 et 1 000 cv (figure 14).

Dans le cas d'un transport par navire de levage, la fondation est achemi-

PROJETS OFFSHORE FRANÇAIS



Zone favorable à l'éolien posé
Zone favorable à l'éolien flottant

- 1- Parc éolien du Tiréport
- 2- Parc éolien de Fécamp - Fondations Gravitaires - Source EDF Énergies Nouvelles
- 3- Parc éolien de Saint-Brieuc
- 4- Parc éolien de Courseulles - Fondations monopieux - Source EDF Énergies Nouvelles
- 5- Parc éolien de l'Île d'Yeu
- 6- Parc éolien de Saint-Nazaire - Fondations monopieux - Source EDF Énergies Nouvelles

© FRANCE TV

10

née sur site, positionnée par le navire et déposée sur l'assise préparée sur le fond marin.

Dans le cas d'un remorquage, une fois la fondation sommairement arrangée en surface par les remorqueurs, le positionnement est ajusté à l'aide de lignes de mouillage déployées par un navire léger et connectées aux lignes d'ancrage préinstallées. La position est enfin

ajustée par mise en tension des différentes lignes de mouillage. L'opération de ballastage peut alors commencer pour permettre de couler la fondation au fond de la mer (figure 15).

Un navire réalise ce ballastage qui peut être liquide, solide ou les deux. La descente de la fondation au fond de l'eau est contrôlée par les treuils qui sont fixés sur la structure flottante. Dans le

cas sans structure flottante, le contrôle de la descente devra être assuré par un ou plusieurs remorqueurs, des vannes installées dans la fondation permettant également de contrôler la descente. Une fois la fondation en position au fond de l'eau, les remorqueurs sont libérés. L'horizontalité de la fondation est mesurée après installation. Dans le cas où les tolérances ne sont pas

respectées, une pièce mécanique peut être ajoutée en partie haute de la fondation afin d'atteindre les critères de verticalité du mât de l'éolienne fixés par le constructeur, généralement compris entre 0,25° et 0,5°.

Enfin, la protection anti-affouillement permettant d'assurer la pérennité de l'assise peut être mise en place suivant un procédé similaire à celui de la préparation du sol. En alternative, il peut également être fait recours à l'utilisation de sacs de graves disposés autour de la fondation.

INSTALLATION DES FONDATIONS JACKET

Les structures jacket, assemblages tubulaires en aciers, sont utilisées historiquement dans l'industrie pétrolière de la mer du Nord. Elles ont donc naturellement été reprises comme fondations des éoliennes offshore et très largement également en sous-structure des postes électrique en mer. Fabriquées en usines, elles arrivent sur le port de construction du site par barge où elles seront ensuite stockées puis installées sur site.

La fondation de ce treillis métallique est en général assurée par des pieux installés préalablement ou postérieurement au positionnement du jacket.

La connexion entre les pieux et la structure métallique est assurée par une liaison cimentaire. Pour une structure de 50 m de hauteur, on estime à environ 650 t son poids moyen (figure 2).

INSTALLATION DES FONDATIONS MONOPIEU

La fondation monopieu est le type de fondation le plus couramment utilisé actuellement. Si les pieux métalliques et en béton sont une solution de fondation classique à terre, leur diamètre est de 1,5 m ou 2 m au maximum. En fondation d'éolienne offshore, le diamètre des monopieux atteint actuellement 6 m environ et des développements de pieux XL sont en cours. Les premiers résultats prédisent une évolution de la technologie vers des diamètres pouvant aller jusqu'à 10 m permettant ainsi la reprise des efforts transversaux et moments associés principalement par butée et contre butée du sol.

Cette fondation est dans les faits généralement constituée de 2 éléments : le monopieu (600 à 800 tonnes) mis en place dans le sol par battage et/ou forage et la pièce de transition (300 à 400 tonnes) installée en tête de monopieu et assurant la liaison entre ce dernier et le mât de l'éolienne.

10- Projets offshore français.
11- Construction des GBS pour le projet Thornton Bank.

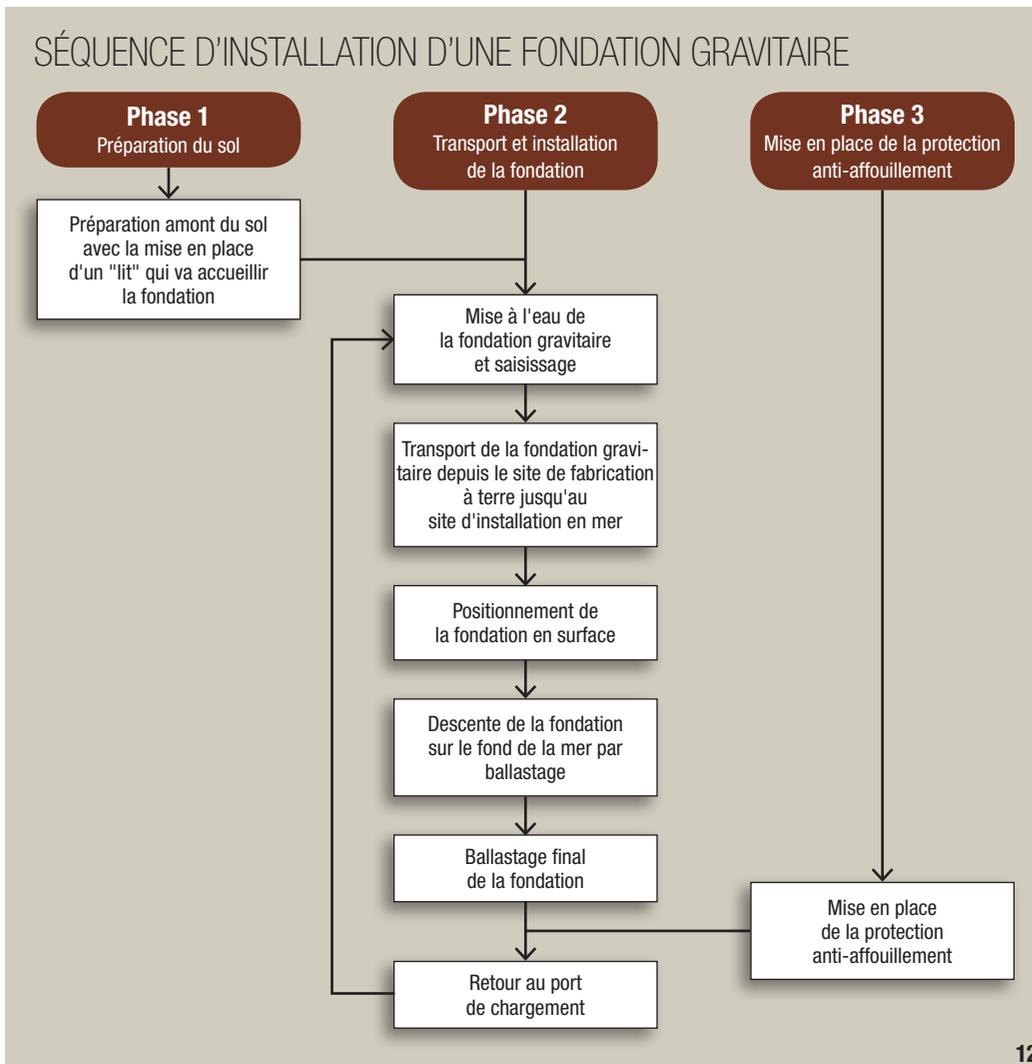
10- Offshore projects in France.
11- Construction of GBS's for the Thornton Bank project.



© C-POWER

11

SÉQUENCE D'INSTALLATION D'UNE FONDATION GRAVITAIRE



12

© EDF ÉNERGIES NOUVELLES

12- Séquence d'installation d'une fondation gravitaire.

13- Transport de GBS.

14- Transport en flottaison d'une fondation gravitaire.

15- Positionnement d'une fondation gravitaire.

12- Installation sequence for a gravity-base foundation.

13- GBS transport.

14- Floating transport of a gravity-base foundation.

15- Placing a gravity-base foundation in position.

le forage terminé, on vient finir de battre le monopieu jusqu'à la profondeur requise, l'anneau de roche sous le pieu étant alors cassé lors du battage. Si la roche est très fracturée, la longueur des passes est réduite afin d'éviter que les parois du trou ne s'effondrent entre le forage et le fonçage du pieu.

Dans le cas particulier où la reprise de battage s'avère impossible, une tête de forage équipée de molettes escamotables peut forer sous le pieu (méthode dite d'« under reaming »), avec de ce fait un diamètre supérieur ou égal au diamètre externe du pieu. Des dispositions comme la cimentation peuvent alors être prises pour assurer la conservation de la rigidité latérale de la structure.

Une fois le monopieu mis en place, la pièce de transition vient coiffer la structure ; elle est ajustée de manière à atteindre les critères de verticalité fixés par le turbinière. La connexion entre le monopieu et la pièce de transition

Tout comme les jackets, les fondations monopieu sont fabriquées en usine, acheminées au port de construction puis installées par battage et/ou forage (figures 16, 17 & 18).

Le navire en charge de l'amenée des fondations monopieux et de leur installation est dans la plupart des cas un navire auto-élévateur d'une longueur pouvant varier entre 100 m et 200 m. La capacité de grue nécessaire pour installer des monopieux de large diamètre se situe aux alentours de 1 200 t. Afin d'optimiser le transport, jusque 5

à 6 monopieux sont embarqués simultanément.

Une fois le navire en position à l'endroit requis, le monopieu est levé du pont à l'aide de la grue du navire, mis en position dans un guide puis descendu jusqu'à toucher le fond de l'eau. Le monopieu commence alors à pénétrer dans le sol sous son propre poids. Une première méthode de mise en place du monopieu dans le sol est le battage à l'aide de marteaux hydrauliques d'une capacité pouvant atteindre jusqu'à 3 500 kJ. Dans les sols parti-

culièrement durs, une alternative par forage peut être utilisée, seule ou en association avec le battage.

Les opérations de forage étant plus longues à réaliser et plus coûteuses, il apparaît préférable de les éviter au profit du battage. Néanmoins, dans le cas où le monopieu atteint le refus avant la profondeur désirée, le recours au forage peut s'avérer indispensable. Afin d'assurer le contact du pieu avec le sol, le diamètre de forage est généralement choisi légèrement inférieur au diamètre du monopieu. Une fois

© C-POWER



13

© SEATOWER



14

© EDF ÉNERGIES NOUVELLES



15

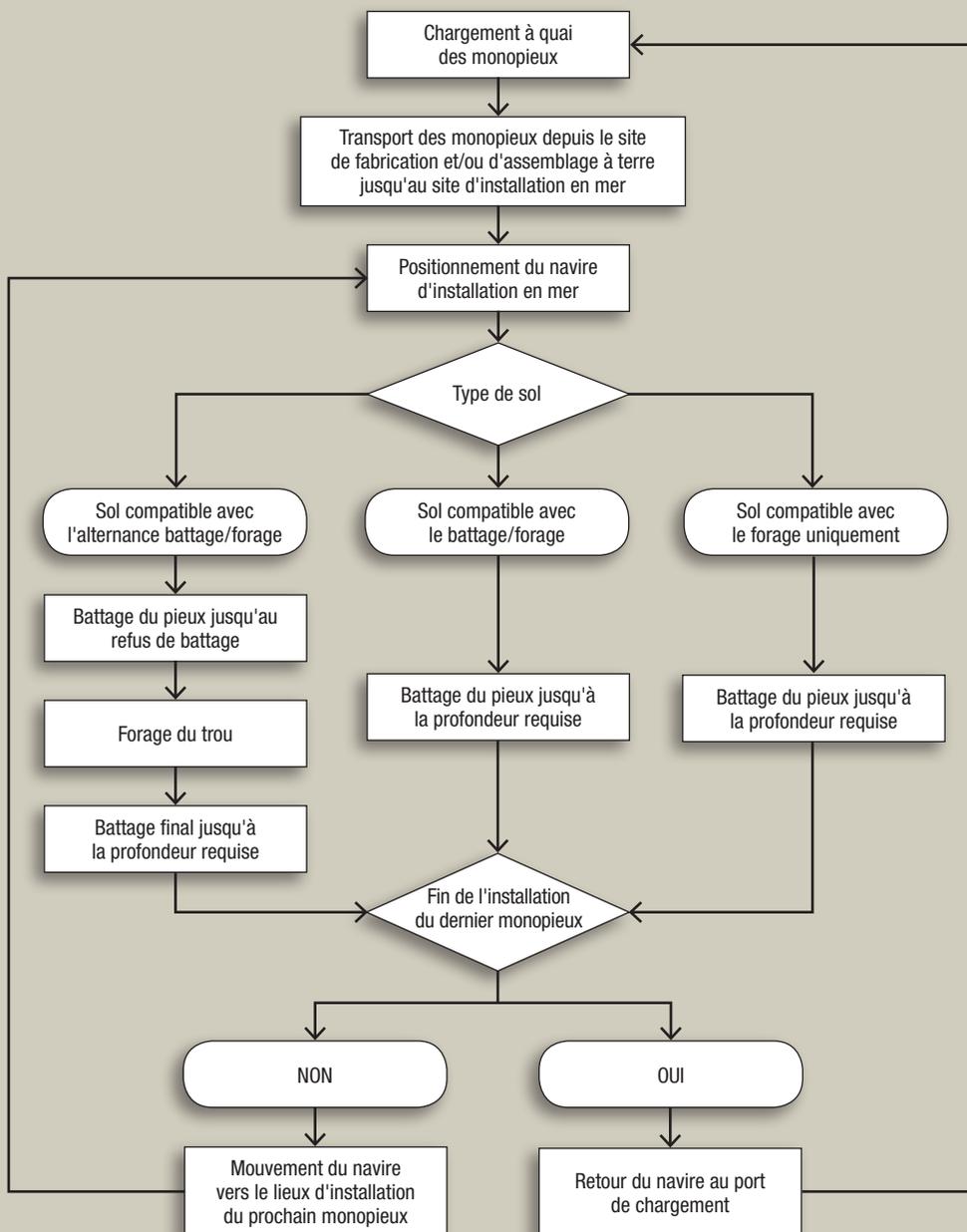


© EDF ENERGIES NOUVELLES

16

17

SÉQUENCE D'INSTALLATION D'UNE FONDATION MONOPIEU



© EDF ENERGIES NOUVELLES

18

16- Chargement de monopieux, projet Teeside.

17- Fondation monopieu, projet Teeside.

18- Séquence d'installation d'une fondation monopieu.

16- Loading monopiles, Teeside project.
17- Monopile foundation, Teeside project.
18- Installation sequence for a monopile foundation.

est généralement cimentaire mais peut également être assurée par une bride boulonnée. Cette deuxième solution, a priori plus sécuritaire, amène néanmoins des contraintes sur le battage du monopieu visant à ne pas engendrer de déformation de la bride supérieure ni réduire la capacité de reprise des défauts d'installation du pieu.

INSTALLATION DES ÉOLIENNES

Suivant la solution et le navire retenus, entre 4 et 7 éoliennes sont transportées par voyage.

Trois méthodes d'installations des éoliennes ont été développées à ce jour : l'installation pale par pale (la plus courante), l'installation en "oreilles de lapins" qui est peu utilisée pour des raisons d'exposition aux aléas météorologiques et l'installation « rotor star », installation simultanée des 3 pales, que l'on retrouve sur quelques projets de construction de parcs éoliens en mer (figures 19 & 20).



19

© C-POWER

Le chargement des éoliennes à bord du navire de transport se fait soit par levage à l'aide de la grue du navire, soit avec des engins multi-roues, selon les moyens et les facilités d'accès au navire disponibles.

Comme pour les éoliennes terrestres, les principales contraintes associées à cette installation sont les aléas météorologiques et la capacité de la grue. Le navire d'installation des éoliennes, opérant entre 50 et 60 m de profondeur, peut être un navire similaire à celui de l'installation des fondations monopieux. La capacité de la grue du navire doit pour cela atteindre 800 t à 1 500 t. Une fois le navire sur le site, il se met en position à environ 25 m de la fondation. Il réalise ensuite le pré-charge de ses jambes sur le fond et s'élève de plusieurs mètres au-dessus du niveau de l'eau. Ensuite, commence l'installation des sections du mât (pré-montées ou non) puis de la nacelle avec deux pales (alternative « Oreilles de lapin »), ou de la nacelle seule et enfin de la(les) pale(s) restante(s) selon la méthode d'installation retenue.

Une fois une éolienne installée, le navire descend le long de ses jambes jusqu'à être posé sur l'eau, remonte ses jambes jusqu'à pouvoir naviguer à faible vitesse puis se repositionne

19- Installation en rotor star.

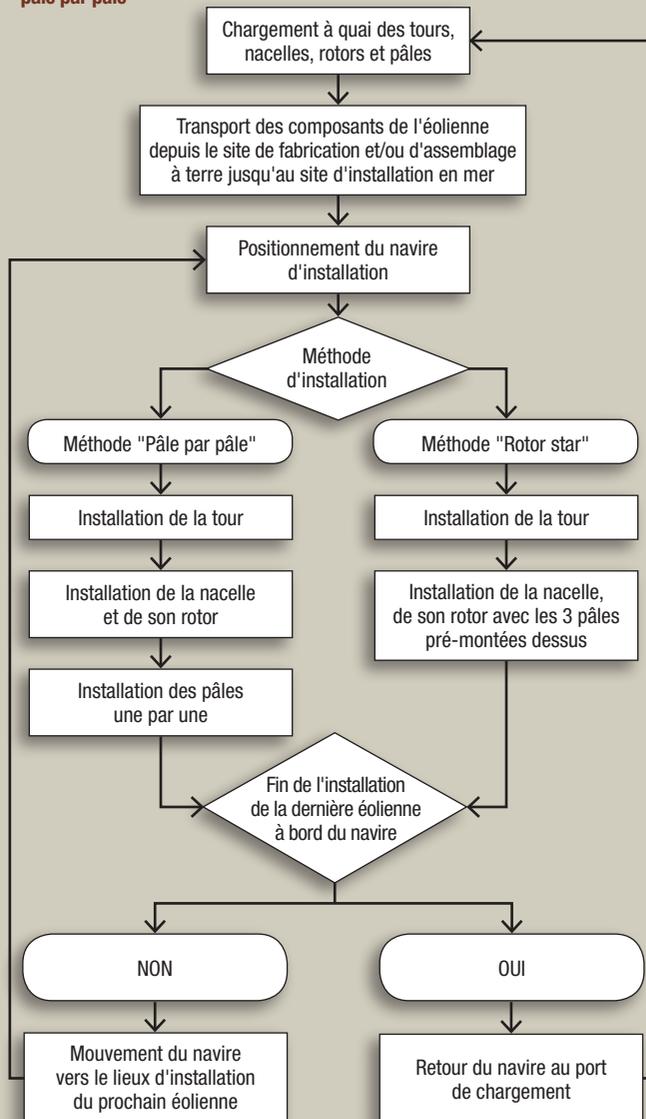
20- Séquence d'installation d'une éolienne pale par pale.

19- Rotor star installation.

20- Installation sequence for a wind turbine blade by blade.

à l'emplacement de l'aérogénérateur suivant et recommence les opérations d'installation jusqu'à ce que l'ensemble des aérogénérateurs soit installé. Il revient alors au quai du port logistique d'assemblage pour charger d'autres aérogénérateurs et recommence son cycle d'installation. Quelle que soit la fondation ou la méthode d'installation offshore, les techniques retenues sont en constante évolution pour permettre de réduire les risques et les coûts et d'envisager la construction d'unités de production sur des sites ignorés jusqu'alors. L'éolien flottant apparaît, dans ce contexte, comme la prochaine voie d'investigation. Le Japon se place actuellement comme précurseur avec

SÉQUENCE D'INSTALLATION D'UNE ÉOLIENNE pale par pale



20

© EDF ÉNERGIES NOUVELLES

des développements importants en cours. La France emboîte le pas avec la construction programmée du projet prototype Mistral au large de Fos-sur-

Mer à l'horizon 2016 qui doit aboutir à la validation en vue de son industrialisation d'un concept d'éolienne flottante à axe vertical. □

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF WIND FARMS, ONSHORE AND OFFSHORE

EDF : PASCALE DE MUYNCK, YVES ROLLAND

The construction of a wind farm brings together various players: *civil engineering firms for the foundations, electricity utilities for the grids, transport operators for machine procurement and installation contractors to erect the wind-power generators. With the gradual increase in machine size and the development of offshore farms, the sector has been forced to adapt the design of all the farms' components and optimise construction methods. Sticking to schedule turns out to be the key for successful construction of a wind-power plant. The schedules are established by the Project Manager in close consultation with the various entities involved in the project and the Owner.* □

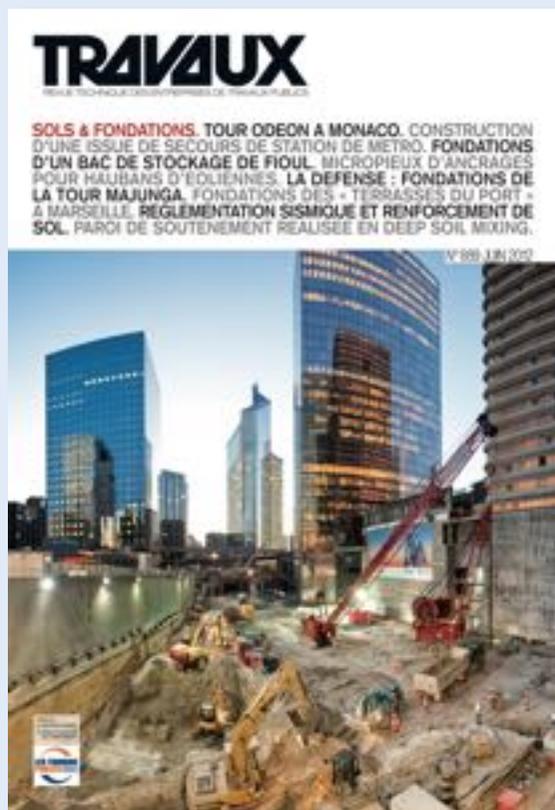
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PARQUES EÓLICOS, DEL TERRESTRE AL OFFSHORE

EDF : PASCALE DE MUYNCK, YVES ROLLAND

La realización de un parque eólico reúne a diferentes actores: *la ingeniería civil para las cimentaciones, las compañías eléctricas para las redes, los transportistas para el aprovisionamiento de las máquinas y los instaladores para el montaje de los aerogeneradores. El aumento progresivo del tamaño de las máquinas y el desarrollo de parques offshore han forzado al sector a adaptar el diseño del conjunto de los componentes de los parques y a optimizar los métodos de construcción. El seguimiento de la planificación es la clave del éxito de una construcción de central eólica. La establece la Dirección de Obra en estrecha colaboración con los diferentes participantes y los Promotores.* □

ABONNEZ-VOUS !

OFFRE SPÉCIALE DÉCOUVERTE **109 €** SEULEMENT, SOIT PLUS DE **20 %** DE RÉDUCTION



Dans la nouvelle formule vous découvrirez...

- Les chantiers en images
- L'actualité de la profession
- Le dossier thématique
- Les interviews des grands décideurs
- La présentation des tendances et innovations du secteur
- Le point de vue des ingénieurs sur les chantiers importants



ABONNEZ-VOUS EN LIGNE SUR WWW.REVUE TRAVAUX.COM OU RENVOYEZ LE BULLETIN D'ABONNEMENT CI-DESSOUS À

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

Oui, je m'abonne à la revue **TRAVAUX**. Je choisis l'offre suivante :

- Offre découverte de 6 mois, 5 numéros pour 109 € au lieu de 138 €, soit plus de 20 % de réduction sur le prix de vente au numéro
- 1 an (9 numéros dont 2 doubles) pour 190 € au lieu de 275 €, soit près de 30 % de réduction sur le prix de vente au numéro
- 1 an Enseignant France : 125 € (certificat attestant votre exercice dans un établissement d'enseignement à joindre à votre règlement)
- 1 an Étudiant France : 50 € (photocopie de la carte d'Étudiant à joindre à votre règlement)
- 1 an International : 240 € (hors France métropolitaine)

Pensez au multi-abonnement !

- Offre d'abonnement multiple à prix dégressifs

Abonnement 1 an (9 numéros dont 3 doubles) France métropolitaine

- 2 à 5 abonnements : 170 € l'abonnement au lieu de 190 €
- 6 à 10 abonnements : 160 € l'abonnement au lieu de 190 €
- Plus de 10 abonnements : 150 € l'abonnement au lieu de 190 €

Je choisis _____ abonnements France Métropolitaine

Abonnement 1 an (9 numéros dont 3 doubles) International et Dom-Tom

- 2 à 5 abonnements : 220 € l'abonnement au lieu de 240 €
- 6 à 10 abonnements : 210 € l'abonnement au lieu de 240 €
- Plus de 10 abonnements : 200 € l'abonnement au lieu de 240 €

Je choisis _____ abonnements International et Dom-Tom

+ l'accès privilégié au site www.revue-travaux.com sur lequel vous disposez de plus de 10 ans d'archives de la revue Travaux.

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

Afin de mieux vous connaître, merci de bien vouloir nous communiquer les renseignements concernant votre activité.

- État / Administration
- Collectivités territoriales
- Établissements publics et parapublics
- Bureaux d'étude et fournisseurs
- Entreprise (précisez)
 - Organisation professionnelle
 - Grands comptes TP
 - Entreprises routières
 - Entreprises indépendantes
- Enseignement
- Presse écrite
- Particuliers

Divers (précisez) _____

Effectif des établissements

- de 1 à 2 (A) de 50 à 99 (D)
- de 3 à 9 (B) de 100 à 499 (E)
- de 10 à 49 (C) > 500 (F)

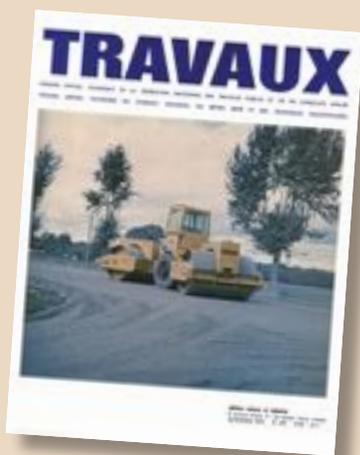
Votre fonction (précisez) _____

Offre valable jusqu'au 31/12/15. Conformément à la loi «Informatique et Libertés» du 6/01/78, 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

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : L'EXÉCUTION DU GÉNIE CIVIL DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE FESSENHEIM

PAR A. LACHAL ET F. HUBINET, RÉGION D'ÉQUIPEMENT CLAMART ÉLECTRICITÉ DE FRANCE
TRAVAUX N°476 - NOVEMBRE 1974

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR PAUL-HENRI GUILLOT, DOCUMENTALISTE-ARCHIVISTE, FNTF



Implantée dans la plaine du Rhin à proximité de Mulhouse, en bordure du Grand Canal d'Alsace, la centrale de Fessenheim est proche de l'Allemagne et de la Suisse. Sa construction a commencé en 1971.

Elle appartient pour 67,5% à EdF et pour 32,5% à des groupes allemands et suisses. Mise en service début 1978, cette centrale assure aujourd'hui 65% de la consommation d'électricité alsacienne. Ses deux réacteurs sont du type Westinghouse à eau pressurisée, technologie américaine défendue à l'époque par Pierre Cabanier et Jules Horowitz, qui a été adoptée pour les 58 réacteurs mis en service en France entre 1977 et 1999. La centrale de Fessenheim a pour modèle celle de Beaver Valley (1976) aux USA qui a obtenu en 2009 de la NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) le renouvellement de sa licence d'exploitation pour une durée totale de 60 ans. Elle a produit 9,2 TWh en 2013. Elle « produit » également de l'emploi pour 850 agents EdF et plusieurs centaines d'employés d'entre-

prises de sous-traitance, ainsi que des recettes fiscales à hauteur de 50 millions d'euros.

Malgré des mises à niveau et la validation régulière de l'ASN (Autorité de Sécurité Nucléaire), de nombreux opposants au nucléaire dénoncent des risques liés à la sismicité, aux inondations, à la pollution de la nappe,

aux chutes d'aéronefs, au terrorisme. En tous cas, s'il est un risque qui avait été totalement sous-estimé, voire ignoré, c'est bien celui des actions de Greenpeace et de ses émules. La mise à l'arrêt définitif de la centrale de Fessenheim en 2016 est une des promesses électorales du président François Hollande.



© FRANCE SOIR

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: PERFORMING CIVIL WORKS FOR THE FESSENHEIM NUCLEAR POWER STATION

TRAVAUX N°476 - NOVEMBER 1974

A. LACHAL - F. HUBINET

The Fessenheim power station, located in the Rhine plain near Mulhouse, on the edge of the Great Alsace Canal, is close to Germany and Switzerland. Its construction was started in 1971. It is 67.5% owned by EDF and 32.5% by German and Swiss companies. This plant, which came into service in early 1978, currently provides 65% of Alsatian electricity consumption. Its two reactors are of the Westinghouse pressure water type, an American technology defended at the time by Pierre Cabanier and Jules Horowitz, which was adopted for the 58 reactors commissioned in France between 1977 and 1999. The Fessenheim power station is modelled on the Beaver Valley plant (1976) in the United States, whose operating licence was renewed in 2009 by the NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) for a total period of 60 years. In 2013 it produced 9.2 TWh. It also "produces" employment for 850 EDF employees and several hundred employees of subcontractor firms, as well as tax revenues to the tune of €50 million. Despite upgrading and regular validation by the French Nuclear Safety Authority (ASN), many opponents of the nuclear industry denounce the risks due to seismicity, flooding, contamination of the aquifer, falling aircraft and terrorism. In any case, if there is one risk that had been completely underestimated, or even ignored, it is clearly the risk of actions by Greenpeace and its emulators. The permanent shutdown of the Fessenheim power station in 2016 was one of the election promises of French president François Hollande. □

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: LA EJECUCIÓN DE LA INGENIERÍA CIVIL DE LA CENTRAL NUCLEAR DE FESSENHEIM

TRAVAUX N°476 - NOVIEMBRE DE 1974

A. LACHAL - F. HUBINET

Implantada en la llanura del Rin cerca de Mulhouse, al borde del Gran Canal de Alsacia, la central de Fessenheim está cerca de Alemania y Suiza. Su construcción comenzó en 1971. Pertenece en un 67,5% a EdF y en un 32,5% a grupos alemanes y suizos. Puesta en servicio a comienzos de 1978, actualmente esta central cubre el 65% del consumo de electricidad alsaciana. Sus dos reactores son del tipo Westinghouse de agua presurizada, tecnología norteamericana defendida en la época por Pierre Cabanier y Jules Horowitz, que fue adoptada para los 58 reactores puestos en servicio en Francia entre 1977 y 1999. La central de Fessenheim tiene como modelo la de Beaver Valley (1976) en Estados Unidos, cuya licencia de explotación fue renovada en 2009 por la NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) para una duración total de 60 años. En 2013, produjo 9,2 TWh. También "produce" empleo para 850 agentes EdF y varios cientos de empleados de empresas de subcontratación, así como ingresos fiscales del orden de 50 millones de euros. A pesar de las actualizaciones y la validación regular de la ASN (Autoridad de Seguridad Nuclear), numerosos opositores a la energía nuclear denuncian riesgos relacionados con sismicidad, las inundaciones, la contaminación de la capa freática, las caídas de aeronaves y el terrorismo. En cualquier caso, si un riesgo se ha subestimado o incluso ignorado, es el de las acciones de Greenpeace y sus émulo. El cierre definitivo de la central de Fessenheim en 2016 es una de las promesas electorales del presidente François Hollande. □

L'exécution du Génie Civil de la Centrale Nucléaire de Fessenheim

A. Lachal

Chef du Service Génie Civil de la Région d'Équipement Clamart Électricité de France

F. Hubinet

Chef de Lot Génie Civil de la Région d'Équipement Clamart Électricité de France

La Centrale Nucléaire de Fessenheim — actuellement en construction sur le Rhin, au nord-est de Mulhouse — comprend deux tranches nucléaires de la filière « uranium enrichi, eau ordinaire » ayant chacune une puissance électrique nette de 890 MW. La mise en service est prévue en 1975 et 1976 respectivement pour chacune de ces deux unités. Cependant, le chantier de Fessenheim, ouvert une première fois en 1967, a été fermé l'année suivante après l'abandon du projet de centrale à « uranium naturel, graphite, gaz » qui y était prévu.

Les premiers travaux de terrassement ont été repris en juillet 1971.

Le site de Fessenheim est situé sur la rive gauche du Grand Canal d'Alsace en amont du barrage et de

l'usine hydroélectrique de Fessenheim. Le débit dans le canal, variable entre 400 et 1 300 m³/s, est de plusieurs fois supérieur aux besoins en eau de réfrigération des condenseurs des deux groupes turbo-alternateurs. Toutefois, dans le cas d'une extension éventuelle de l'aménagement en cours, les tranches futures seraient refroidies en circuit fermé au moyen de tours de réfrigération atmosphérique.

La superficie du site (106 ha) permet l'implantation d'environ six tranches nucléaires (fig. 1).

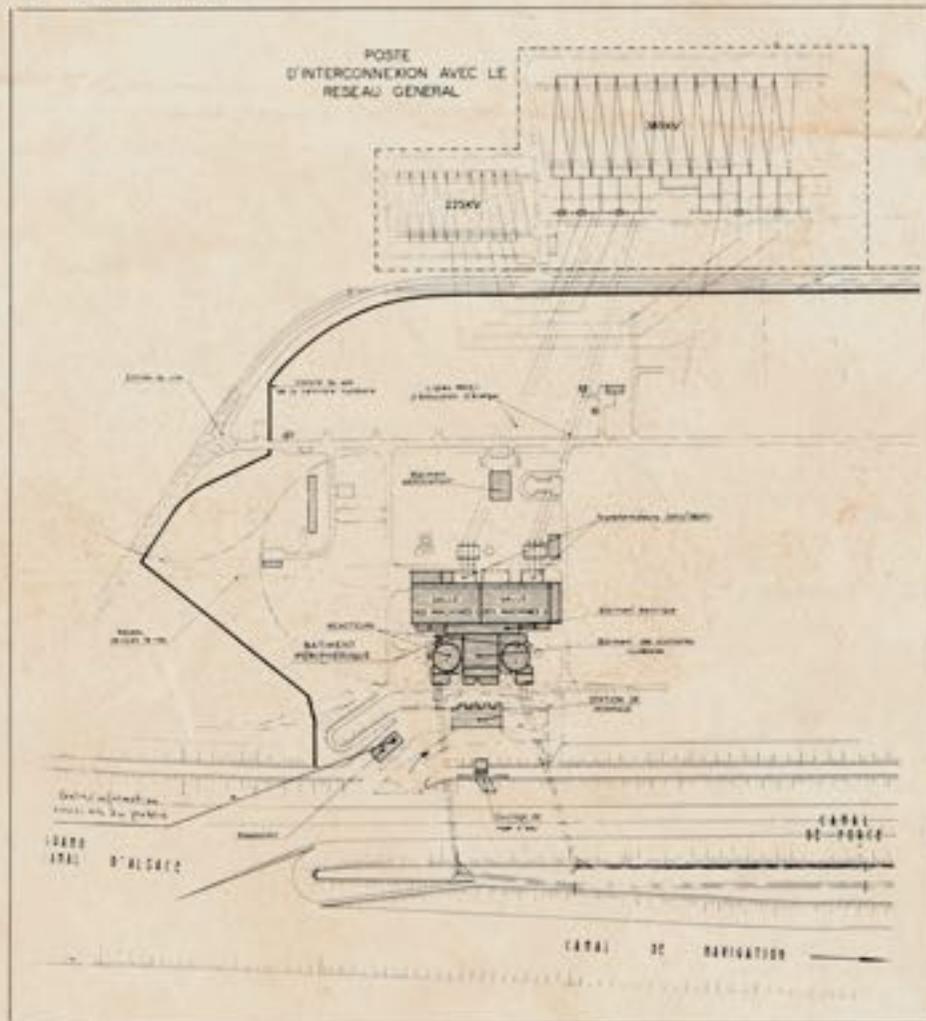
À l'ouest du site de la centrale est prévu le poste électrique haute tension d'évacuation d'énergie vers le réseau général 380 kV. Une liaison de secours par deux lignes électriques 225 kV, depuis le poste haute tension de l'usine hydroélectrique, assure l'alimentation des auxiliaires de sécurité de la centrale, en cas de défaut sur le réseau 380 kV.

Les ouvrages de la centrale reposent sur la couche d'alluvions sablo-graveleuses de la fosse rhénane située entre les Vosges et la Forêt Noire. L'épaisseur d'alluvions est d'environ 150 à 200 m au niveau de Fessenheim. Cette caractéristique particulièrement favorable du site a considérablement simplifié les fondations des ouvrages.

La région de Fessenheim est située dans une zone de sismicité faible (degré VII d'intensité de l'échelle Mercalli modifiée). Les ouvrages sont conçus pour maintenir l'intégrité des réacteurs et des fonctions de sécurité associées pour les séismes de degré VIII.

La région de Fessenheim est située dans une zone de sismicité faible (degré VII d'intensité de l'échelle Mercalli modifiée). Les ouvrages sont conçus pour maintenir l'intégrité des réacteurs et des fonctions de sécurité associées pour les séismes de degré VIII.

Fig. 1 Vue d'ensemble du site



1 LE SCHEMA GENERAL DE FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE (Fig. 2 et 3)

Chaque tranche, du type Westinghouse à eau sous pression (PWR - Pressurized Water Reactor), comprend les principaux éléments suivants:

1.1 Un réacteur nucléaire constitué par 157 assemblages de combustible verticaux ayant chacun 204 crayons (tube en zircaloy de 10 mm de diamètre contenant des pastilles d'oxyde d'uranium — UO₂ — enrichi entre 2 et 3,5 p. 100 en uranium 235). L'eau circulant autour des crayons combustibles est utilisée à la fois comme modérateur et pour l'évacuation des calories.

Le contrôle de la réaction nucléaire, donc de la puissance du réacteur, est assuré par le mouvement vertical de 53 grappes d'absorbants neutroniques (argent - cadmium - indium) s'insérant entre les crayons de combustible. Un réglage complémentaire est effectué par la variation de la teneur en acide borique de l'eau de refroidissement du réacteur, le bore étant un absorbant neutronique très efficace.

1.2 Le réacteur est contenu dans une cuve en acier, dont les caractéristiques sont les suivantes : cylindre vertical avec deux fonds hémisphériques ; 4 m de diamètre intérieur ; 12,3 m de hauteur ; 200 mm d'épaisseur ; poids total 332 t ; acier au manganèse-molybdène avec revêtement intérieur en acier inoxydable.

1.3 Le réacteur est refroidi par de l'eau sous pression à 155 bar circulant en circuit fermé dans le circuit primaire, constituant ainsi la chaudière nucléaire ; l'eau sortant du réacteur à 322° C traverse en parallèle trois boucles de refroidissement comprenant chacune un échangeur de chaleur (générateur de vapeur), une moto-pompe de 20 100 m³/h et les tuyauteries de liaison avec la cuve du réacteur. La chaudière nucléaire a une puissance thermique nominale de 2 600 MW.

1.4 Côté secondaire des trois générateurs de vapeur, la vapeur produite (5 200 t/h à 57 bar saturée) alimente un groupe turbo-alternateur, dimensionné pour 970 MW électriques permettant une augmenta-

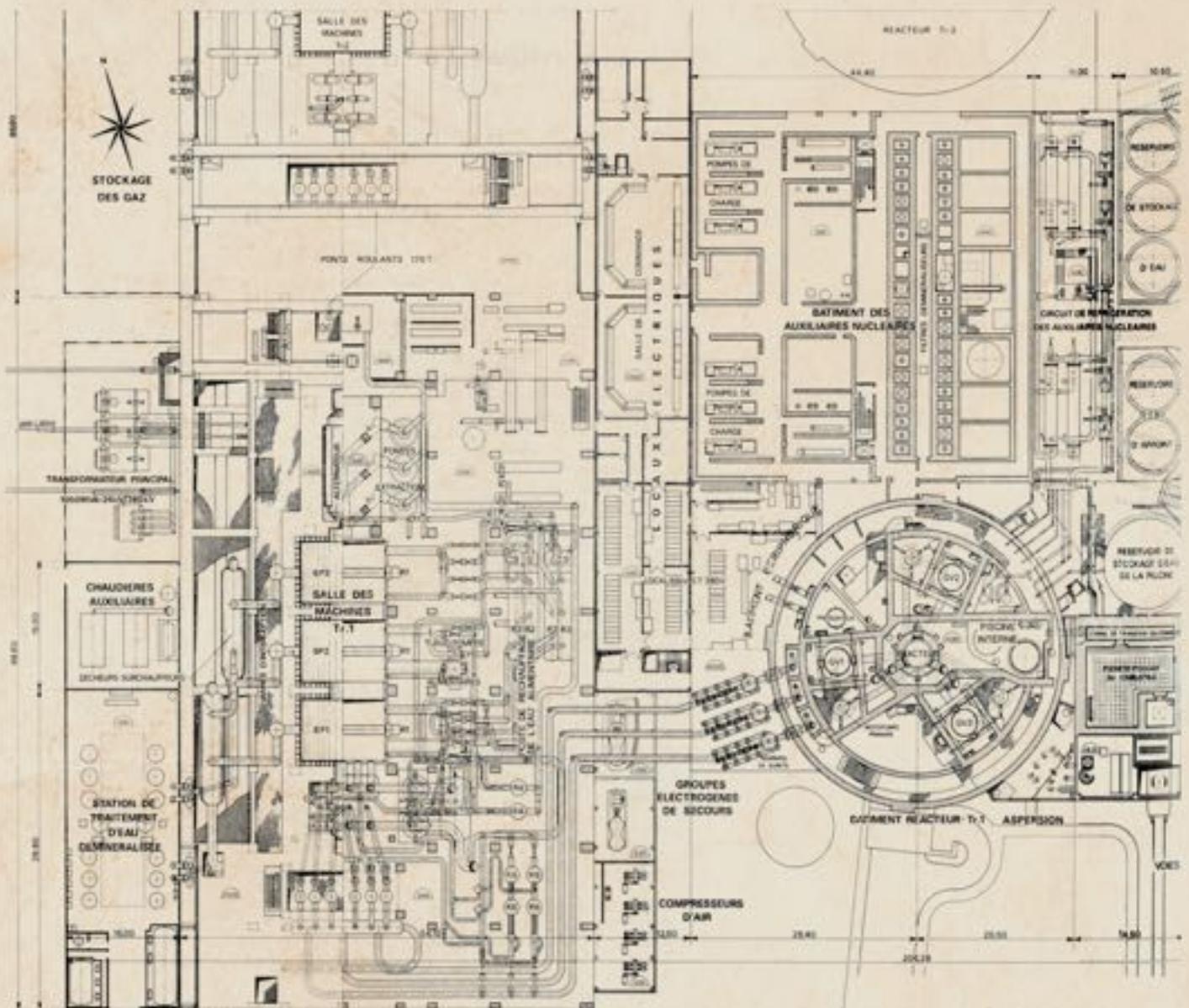


Fig 2 Vue en plan, 1^{re} tranche et parties communes.

tion éventuelle de la puissance thermique de la chaudière jusqu'à 2770 MW. En une seule ligne d'arbre tournant à 1500 t/mn, la turbine comprend un corps haute pression et trois corps basse pression à double flux.

L'alternateur triphasé (1079 MVA, 24 kV, 26 000 A, refroidi par eau et hydrogène) est relié au réseau 380 kV par un transformateur triphasé 24/380 kV puis par une ligne électrique vers le poste d'évacuation d'énergie.

Après échappement de la turbine, la vapeur est condensée. L'eau d'extraction du condenseur est renvoyée à l'entrée des trois générateurs de vapeur après avoir été réchauffée jusqu'à 216° C, au travers du poste de réchauffage alimenté en vapeur soustraite dans la turbine en cours de détente.

1.5 Le refroidissement du condenseur est assuré par la circulation d'eau du Grand Canal d'Alsace prélevée à la station de pompage commune aux deux tranches (deux motopompes par tranche de 21,5 m³/s chacune). L'eau est rejetée dans le canal en amont de l'usine hydroélectrique.

1.6 Diverses installations complémentaires sont prévues : auxiliaires électriques, poste de traitement

d'eau, station de traitement des effluents radioactifs, manutention et stockage du combustible, réfrigération auxiliaire, auxiliaires de sauvegarde, etc.

2 L'IMPLANTATION GENERALE

Les deux tranches nucléaires sont jumelées, permettant ainsi la mise en commun de certains auxiliaires généraux.

Les différents bâtiments ont été rapprochés afin de réduire au minimum les longueurs des liaisons importantes : tuyauteries principales de vapeur, galeries d'eau de circulation, câbles électriques, etc.

Chaque tranche comprend les bâtiments suivants :

2.1 Le bâtiment - réacteur -

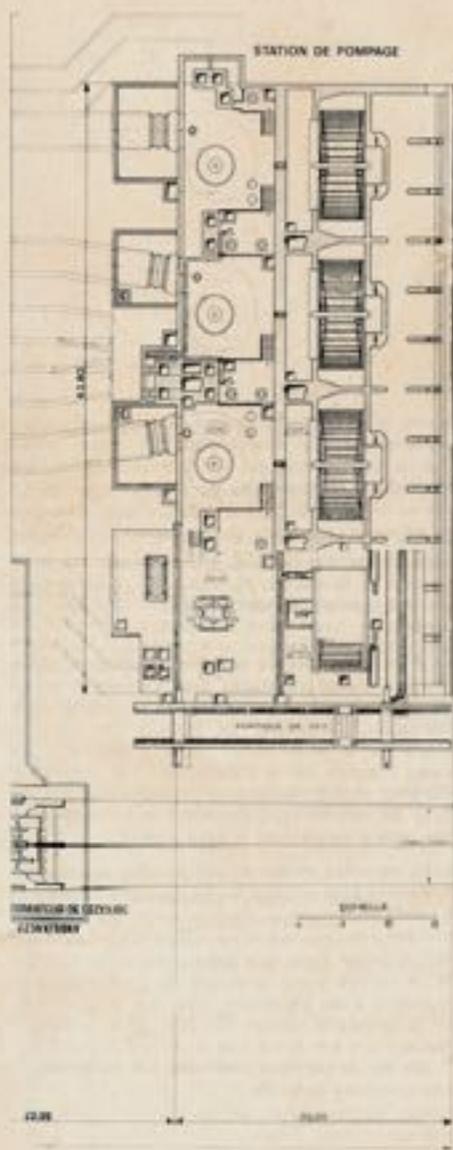
Il contient la chaudière nucléaire et certains équipements de sécurité du réacteur. Ce bâtiment, en béton précontraint avec une peau métallique interne, a la forme d'un cylindre vertical surmonté d'une coupole. Sa résistance et son étanchéité sont déterminées pour confiner les fuites éventuelles de substances radioactives de la chaudière nucléaire, en toutes circonstances, jusques et y compris le cas

accidentel très improbable de rupture de la plus forte tuyauterie du circuit primaire de refroidissement du réacteur.

À la suite d'un tel « accident de référence », l'eau dépressurisée du circuit primaire (290 m³, 155 bar, 300°C) se répandrait dans le bâtiment réacteur sous forme de vapeur et la pression pourrait atteindre environ 3,7 bar effectif. Un système de pompage, puisant l'eau dans un réservoir extérieur serait alors mis en action pour pulvériser de l'eau au travers de rampes d'aspersion disposées en partie haute du bâtiment, celle-ci ayant pour effet de condenser la vapeur d'eau et de ramener rapidement la pression dans l'enceinte au voisinage de la pression atmosphérique, éliminant ainsi tout risque de fuites au travers de cette enceinte.

Les principales caractéristiques de ce bâtiment sont :

- diamètre intérieur du bâtiment réacteur : 37 m ;
- hauteur intérieure du bâtiment réacteur : 55 m ;
- volume total : 54 700 m³ ;
- volume libre : 46 300 m³ ;
- pression en cas « d'accident de référence » : 3,7 bar effectif ;
- pression d'épreuve : 1,15 x 3,73 = 4,3 bar ;



— taux de fuite maximum : 0,3 p. 100 par jour de la masse de gaz contenue dans l'enceinte à la pression maximale d'accident.

Pendant le fonctionnement du réacteur, le bâtiment est fermé. Des traversées étanches sont aménagées au travers du fût de l'enceinte pour le passage des câbles électriques et des tuyauteries. Un sas permet l'accès du personnel d'exploitation.

À l'est et à l'ouest du bâtiment « réacteur » sont accolés des locaux contenant les auxiliaires de refroidissement de secours du réacteur et d'aspersion de l'enceinte.

2.2 La salle des machines (fig. 4)

Orientée suivant l'axe nord-sud, elle est située à l'ouest du bâtiment « réacteur ». Elle abrite le groupe turbo-alternateur, le condenseur placé sous le turbine et le poste d'eau alimentaire de la chaudière.

L'alternateur est raccordé par trois gaines coaxiales 24 kV sur le transformateur triphasé placé contre la salle des machines. Cette disposition facilite le passage de la ligne électrique 380 kV vers le poste d'évacuation haute tension. Les galeries d'amenée et de retour d'eau de circulation du condenseur (par tranche : quatre galeries de 3 x 3 m de section) passent sous le bâtiment des auxiliaires nucléaires.

Les principales dimensions de la salle des machines sont les suivantes : longueur, 88 m ; largeur, 54 m ; hauteur depuis le radier du condenseur jusqu'au plancher du groupe, 18,50 m.

Les salles des machines des deux tranches sont en prolongement l'une de l'autre afin de pouvoir utiliser en commun les engins lourds de manutention : deux ponts roulants de 170 t.

2.3 Le bâtiment des auxiliaires nucléaires

Commun aux deux tranches, il est situé entre les deux bâtiments « réacteur ». Il contient les équipements auxiliaires nécessaires au fonctionnement des deux chaudières nucléaires : circuit d'épuration et de changement de concentration en bore de l'eau de la chaudière nucléaire, circuits de décontamination des effluents liquides et gazeux provenant de la chaudière, circuit de stockage et conditionnement des déchets solides radioactifs, circuits de ventilation, etc...

2.4 Le bâtiment « combustible »

Implanté à l'est de chaque bâtiment « réacteur », il contient la piscine de stockage pour désactivation du combustible irradié. Un tube reliant cette piscine avec la piscine intérieure au bâtiment « réacteur » sert au transfert du combustible entre les deux piscines lorsque le réacteur est en cours de chargement - déchargement. Une voie ferrée dessert le bâtiment « combustible » pour transport des conteneurs devant évacuer le combustible irradié vers l'usine de traitement.

2.5 Le bâtiment « électrique »

Commun aux deux tranches, il est placé au centre de gravité de la centrale. Il contient la salle de commande, les tableaux d'alimentation électrique des auxiliaires, les armoires d'automatisme et de régulation. Il communique avec tous les autres bâtiments par des galeries dans lesquelles cheminent les câbles électriques.

2.6 Les ouvrages de prise et de rejet d'eau (fig. 5)

Ils sont communs aux deux tranches. Un canal en dérivation sur le Grand Canal d'Alsace alimente

Fig. 4. Vue vers l'Ouest, salle des machines, tranche 2. Table du massif du groupe

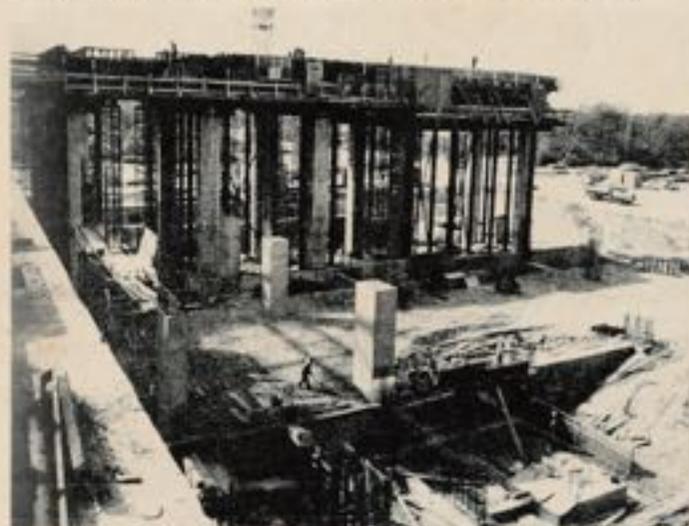
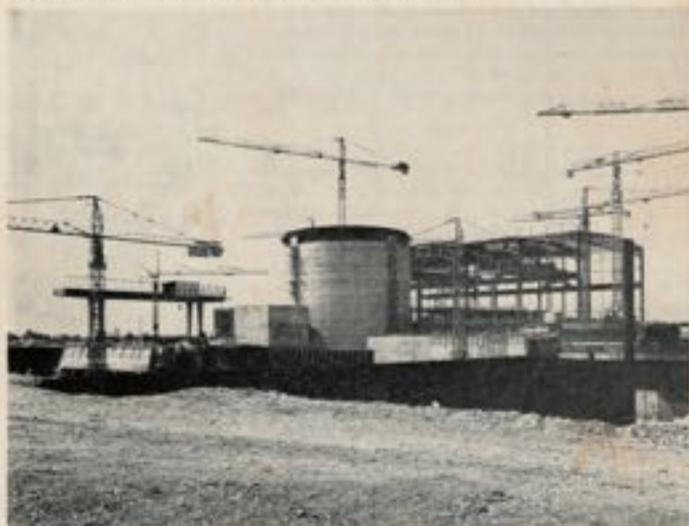


Fig. 5. Vue vers le Sud-Ouest. Canal d'amenée, bouchon Nord.



directement la station de pompage qui contient l'installation de filtration et les pompes de circulation d'eau de condensation. Les galeries de retour d'eau passent sous la station de pompage et sont raccordées à l'ouvrage de rejet situé sur la berge du grand Canal d'Alsace.

2.7 Les autres bâtiments annexes

Placés autour des bâtiments principaux, ils complètent la centrale : compresseurs d'air, diesels de secours, chaudières auxiliaires, station de déminéralisation d'eau, réservoirs de stockage d'eau, ateliers, magasins, bâtiment administratif, restaurant, etc.

3 LES CONDITIONS PARTICULIÈRES DE CONSTRUCTION PROPRES À LA CENTRALE

En dehors des problèmes de fondations qui sont spécifiques du lieu de réalisation des ouvrages et classiques pour tout ouvrage de Génie Civil, les impératifs propres à une centrale électrique nucléaire à eau sous pression ont guidé la conception des ouvrages au point que certains sont très particuliers à ce genre de réalisations.

Il en est ainsi du bâtiment « réacteur » : son rôle de résistance à la pression de l'accident de référence

impose une forme cylindrique fermée, en partie supérieure, par une coupole. Cette forme est bien adaptée au rangement du matériel de la chaudière nucléaire dont les parties essentielles sont la cuve du réacteur placée dans l'axe du bâtiment et les trois boucles des trois générateurs de vapeur répartis en étoile autour de celle-ci.

La vaporisation de l'eau du circuit primaire en cas d'accident pouvant se faire en quelques dizaines de secondes, le régime transitoire qui en résulte induit des différences de pression notables entre les divers locaux dont les parois doivent être étudiées en conséquence.

La présence de fluide pouvant être radioactif conduit à séparer les matériels les uns des autres par des murs ou planchers épais en béton assurant la protection biologique des personnes chargées de l'inspection ou de l'entretien. Cette considération de protection biologique dimensionne les ouvrages tels que les locaux intérieurs au bâtiment « réacteur » et le bâtiment des auxiliaires nucléaires.

L'effet des secousses telluriques est pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages. Sur la carte des intensités sismiques maximales probables de la France établie par l'Institut de Géophysique de Strasbourg (Professeur Rothe), le site de Fessenheim est classé dans une zone de degré VII de l'échelle macrosismique internationale d'intensité.

Sous l'effet d'un tel séisme, la chaudière nucléaire doit pouvoir continuer à fonctionner normalement et

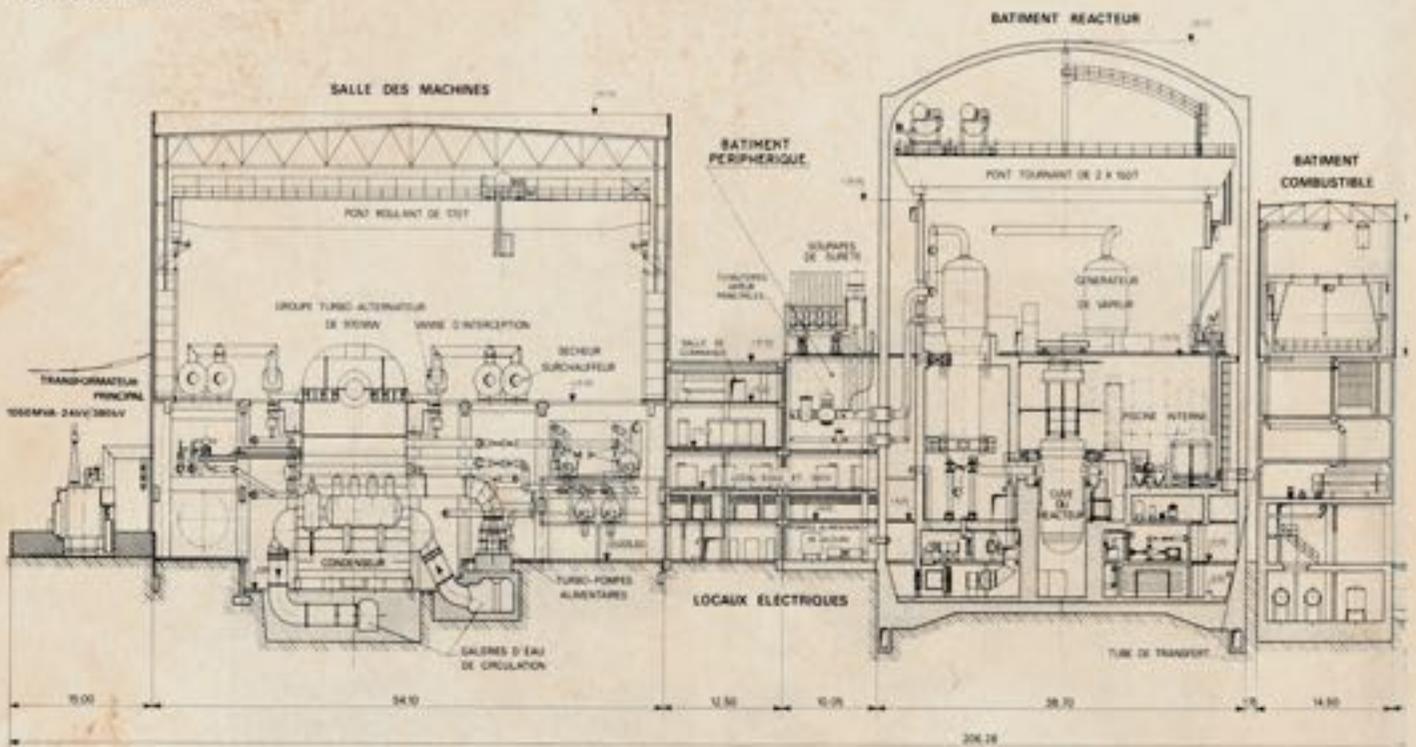
aucun relâchement de produit radioactif ne doit se produire, même en cas de fuite des circuits primaires, ce qui implique que les bâtiments abritant ces matériels et leurs organes de commande ne doivent pas se déformer de façon sensible et que l'enveloppe du bâtiment « réacteur » doit conserver son intégrité.

Sous l'effet d'un séisme d'intensité VII, l'arrêt en sécurité de la réaction nucléaire doit rester possible et l'intégrité du bâtiment « réacteur » doit être conservée.

La prise en compte de ces effets sismiques nécessite des études vibratoires des ouvrages. Il en est de même de la fondation du massif du groupe turbo-alternateur, l'amplitude de vibration de tous les points de la table devant rester inférieure à une valeur imposée par le constructeur. Ces critères de vibration sont à respecter simultanément à des critères de déformation garantissant le bon alignement des paliers supports de la ligne d'arbre.

Enfin, certaines parties d'ouvrages sont spécialement renforcées pour protéger les équipements nécessaires à l'arrêt en sécurité du réacteur contre les projectiles pouvant provenir, soit de la rupture d'un disque porteur d'ailettes d'une roue turbine, soit du jet résultant de la rupture d'une tuyauterie de vapeur ou d'une tuyauterie d'eau alimentaire, ainsi que le fouettement de la tuyauterie rompue. De plus, pour le bâtiment réacteur il a été vérifié que la chute d'un avion type F 104 sur ce bâtiment n'entraîne pas de dommages à la chaudière nucléaire.

Fig. 3 Coupe transversale.



4 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les principales caractéristiques du site, sur le plan de l'exécution du Génie Civil, sont :

— la nature du terrain : excellente, puisque composée d'une couche de plus de 100 m d'alluvions sablo-graveleuses ;

— le niveau de la « source froide » : le canal d'Alsace est construit en remblai et son niveau, au droit de la centrale, est à 9,00 m au-dessus de la plate-forme générale du site.

— la compacité des ouvrages : l'ensemble du chantier pour les 2 tranches, y compris la station de pompage, s'inscrit dans un carré d'environ 250 m de côté. De plus, les divers bâtiments sont mitoyens.

— le programme prévisionnel d'exécution : environ 30 mois pour exécuter le gros-œuvre des deux tranches ;

— les quantités à mettre en œuvre (pour les 2 tranches) : terrassement : 300 000 m³ ; béton : 130 000 m³ ; coffrage : 270 000 m² ; aciers à béton armé : 18 000 t ; câbles pour précontrainte : 1 700 t ; ciment : 45 000 t ; charpente métallique : 2 500 t.

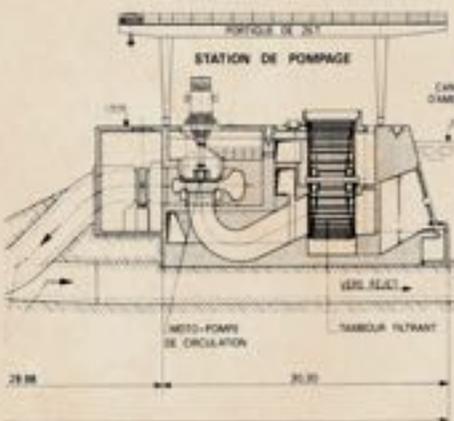
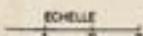
Les valeurs caractéristiques moyennes des ouvrages en béton armé sont :

— ouvrages conventionnels : coffrage : 1,95 m²/m³ ; aciers : 124 kg/m³.

— structures internes des enceintes : coffrage : 2,55 m²/m³ ; aciers : 210 kg/m³.

Toutefois, certains ouvrages notamment les radiers des enceintes et certaines dalles « antiprojectiles » présentent des densités de ferrailage beaucoup plus élevées : 350 kg/m³ et même plus de 500 kg/m³.

— les difficultés de réalisation proprement dites, notamment pour l'exécution des structures internes, dues à la forme des ouvrages déjà difficiles à représenter sur plan et à la forte densité des fourreaux, trémiss et zones réservées pour le montage du matériel.



5 DÉROULEMENT DU CHANTIER

5.1 Programme

À la date du 1^{er} août 1974, le gros œuvre des 2 tranches est pratiquement terminé. Son exécution a suivi, dans sa presque totalité, le programme pré-établi, sauf les structures internes du bâtiment réacteur tranche 1 dont la finition a présenté 4 mois de retard.

Les dates principales d'exécution sont :

	Tranche 1	Tranche 2
Début terrassement :	15- 7-71	
Mise en place du premier béton :	10-10-71	

Salle des machines :

Coulage des tables de groupe :	15- 7-72	20- 5-73
Couverture :	1- 5-73	1- 3-74

Locaux électriques :

Mise à disposition :	1- 8-73	15- 8-74
----------------------	---------	----------

Bâtiment des auxiliaires nucléaires :

Couverture :	15- 8-73	
--------------	----------	--

Bâtiments réacteurs :

Fermeture dôme métallique :	25- 6-73	15- 3-74
Fin des structures internes :	1- 9-73	1- 4-74
Mise à disposition pont-tourant :	1-10-73	1- 6-74
Finition précontrainte (prévision) :	15- 3-75	15- 6-75

Ouvrages d'eau :

Finition station de pompage :	15-10-73	
Finition rejet d'eau :	1-12-73	
Mise en eau du canal de prise :	1- 2-74	
Mise en eau station de pompage :	10- 3-74	

5.2 Le montant des travaux

Le montant global des travaux de génie civil, pour les deux tranches, est d'environ 200 M de francs actuels, dont les 2/3 approximativement pour le gros œuvre.

5.3 Les entreprises

Les principales entreprises ayant participé à la construction sont :

— Campenon Bernard Europe pour les bâtiments réacteurs.

La peau métallique a été sous-traitée à « Constructions Métalliques de Provence ».

— Capag Cetra pour tous les autres ouvrages : au bordereau de prix, sur plans fournis par E.D.F.

— Société Industrielle de Constructions métalliques et d'entreprise générale pour les charpentes métalliques.

— Lefter pour les menuiseries et serrureries métalliques.

— Constructions navales et industrielles de la Méditerranée pour les revêtements inoxydables des piscines.

— Prezioso pour les peintures sur béton.

— Les bureaux d'études Sechaud et Metz, et Galery pour l'étude et le dossier des plans d'exécution des ouvrages en béton armé.

5.4 Les moyens mis en œuvre par les entreprises

La partie la plus délicate de ces installations est représentée par les moyens de manutention. En effet, la compacité des ouvrages et le programme ont amené les entreprises et E.D.F. à une concertation très poussée au niveau de l'étude de ces moyens ainsi qu'au suivi très détaillé de ces matériels pendant les différentes phases d'exécution.

Ces installations, outre les grues mobiles de chantier, ont consisté principalement en grues-tours, soit fixes, soit translatables, tant pour l'exécution de la maçonnerie que pour le montage de la charpente.

D'une puissance moyenne de 200 t.m, environ, leur nombre s'est élevé jusqu'à 12 engins présents simultanément sur le chantier proprement dit, sans compter deux grues de puissance plus faible pour desservir les « parcs à ferraille » :

4 (2 par tranches) grues fixes pour CBE
6 grues translatables pour Capag-Cetra.
2 grues mobiles pour Simeg.

De nombreuses réunions ont été nécessaires tout au long du chantier pour la coordination de ces engins, tant au niveau responsables d'entreprise, qu'au niveau des grutiers. Leur secteur d'emploi se recoupant, il a été admis comme limite d'implantation que le contrepoids d'une grue ne devait pouvoir toucher le fût d'une autre. Naturellement, les priorités et les positions de girouette devaient être très précises.

En plus de ces grues, il a été nécessaire d'utiliser des moyens exceptionnels pour le levage des ponts roulants de salle des machines et pour la mise en place du dôme métallique et du pont tournant de chaque bâtiment réacteur. Ces engins sont décrits plus loin.

— La totalité des aciers pour béton armé a été livrée par voie ferrée et les armatures façonnées sur place, la majorité en acier à haute adhérence.

— Les câbles pour précontrainte ont été façonnés en usine et livrés par route sur le site.

— Le ciment a été approvisionné d'Altkirch, avec beaucoup de régularité, par camions : tout en CPF 325, sauf pour le béton précontraint : CPA 325.

— Les agrégats, livrés par une sablière située légèrement en aval du site se répartissent en quatre constituants :



Fig. 6 Vue vers le Nord-Est, bâtiment réacteur tranche 2, ferrillage du radier



Fig. 7 Intérieur de l'enceinte, vue vers le Nord

sable 0-3 : concassé ;
sable 0-6 : roulé ;
gravillon 6-16 : roulé ;
gravier 16-32 : roulé.

— Les installations de bétonnage :

Une centrale à béton automatique de 40 m³/h pour Capag Cetra

Une centrale à béton automatique de 15 m³/h pour Campanon Bernard.

Le transport du béton mouillé a été assuré par camions malaxeurs, et par camions et dumpers.

Plusieurs mélanges ont été constamment employés, soit en 0-16 pour les zones fortement armées, soit en 0-32, aux dosages variables de 300 kg/m³ ou 350 kg/m³, et 375 kg/m³ pour le béton précontraint.

Les nombreux essais ont permis de constater une remarquable régularité des résultats à la rupture du béton pour les différentes résistances imposées, par ailleurs classiques, et confirmées par les essais de conformance.

On ne peut clore ce chapitre sans mentionner que si les quantités de béton à mettre en œuvre journalièrement furent peu importantes en volume pour les bâtiments réacteurs (pièces de 50 m³ au maximum sauf pour les radiers), la rapidité d'exécution des bâtiments principaux a obligé les responsables de Capag-Cetra à soutenir une cadence de bétonnage importante pour ce genre d'ouvrage : 85 000 m³ en 30 mois (3 400 m³ mensuels en moyenne de décembre 1971 à juillet 1973).

5.5 Les fondations et ouvrages sous terrain naturel

La nature du terrain a permis de ne pas envisager de fondations spéciales et de fonder soit sur semelles (salle des machines, locaux électriques), soit sur radier (bâtiments réacteurs, et bâtiments des auxiliaires nucléaires).

Par rapport à la plate-forme générale du site, les niveaux de fondation s'étagent de - 4,00 à - 10,00 m, alors que le niveau de la nappe est à environ - 7,50.

La difficulté majeure a été la proximité du canal d'Alsace dont le niveau est à 9,00 au-dessus du terrain naturel. Les digues sont en remblai d'alluvions, revêtues côté eau de dalles en béton armé d'environ 10 cm d'épaisseur.

Le rabattement de la nappe a été réalisé, pour chaque tranche, par pompage dans une souille située à proximité du bâtiment réacteur (présentant les fondations les plus profondes à - 10,00) avec un débit toujours inférieur à 500 l/s. Deux pompes en série

permettaient de relever de - 12,00 à 0,00, puis de 0,00 à + 10,00 (dans le canal d'Alsace).

Ce rabattement principal a permis de limiter le pompage dans la fouille de la salle des machines (fondations à - 8,00) à moins de 250 l/s. Les puits des pompes d'extraction et de reprise de purges ont été hautes dans la nappe, à partir de - 8,00, avec les enveloppes définitives cylindriques en béton armé, puis coulage du fond sous l'eau.

5.6 Les ouvrages d'eau

— Les galeries d'eau de circulation (2 galeries d'amenée et 2 galeries de rejet par tranche) ont été coulées sur place et forment radier étalonné du bâtiment des auxiliaires nucléaires et d'une partie des locaux électriques. Leur construction a fait partie de chacun des ouvrages traversés et n'a pas posé de problèmes particuliers.

— La station de pompage (2 pompes de 20 m³/s par tranche) se singularise, au contraire des habitudes, par une construction à sec et en élévation du fait des digues en remblai ; elle se raccorde à ces dernières par des murs d'affleurement en palplanches.

Il n'y a pas de difficultés particulière pour cette construction, sauf la nécessité de terminer la totalité de l'ouvrage (des 2 tranches), non seulement avant la mise en eau du canal d'amenée, mais encore avant d'ouvrir la digue du canal d'Alsace, et ce pour des raisons de sécurité.

— Le canal d'amenée est parallèle au canal d'Alsace, et revêtu, comme ce dernier, des dalles en béton armé.

Ce canal a été entièrement terminé derrière la digue du canal d'Alsace avant que cette dernière ne soit touchée par les travaux, afin d'éviter tout renard ou fuites d'eau risquant de vider le bief et noyer ainsi la plaine, ou d'arrêter la navigation fluviale.

L'ouverture de la digue s'est faite à l'abri d'un batardeau en palplanches forcé dans le talus revêtu du canal d'Alsace. Chaque paire de palplanches battue a créé une entrée d'eau importante au travers du revêtement, nécessitant d'abord un colmatage provisoire aux gravillons et aux scories, puis au ciment. Ce colmatage a été réalisé par des hommes-grenouilles.

Après mise en eau, et découpage sous l'eau du batardeau, un colmatage définitif a été effectué, également par plongeurs.

6 LA CONSTRUCTION DES BATIMENTS

6.1 Bâtiment réacteur (fig. 6)

Les ouvrages abritant les chaudières nucléaires sont conçus pour répondre principalement à des critères de résistance et d'étanchéité. Pour satisfaire cette dernière sujétion, il a été prévu que l'enceinte en béton (constituée d'un cylindre en béton de 37 m de diamètre et 55 m de hauteur) serait doublée intérieurement et complètement d'une peau métallique d'étanchéité.

6.1.1 Enceinte - Peau métallique (fig. 7)

La peau métallique d'une épaisseur constante de 6 mm est ancrée dans le béton.

— l'étanchéité horizontale sur radier est réalisée par des tôles plates reposant sur le béton, les bords étant soudés en cordon continu sur la face supérieure de 1/2 tôle IPE ancrés et noyés dans le radier. Si aucun problème n'est apparu pour respecter la tolérance (tôle située entre 2 plans horizontaux distants de 15 mm), les opérations de soudage ayant eu lieu durant une période très pluvieuse, certaines difficultés dues à la présence d'eau sous les tôles ont été levées après construction d'un abri bâché au-dessus du radier.

— La partie intermédiaire entre fond et partie cylindrique est assurée par un tore et un tronç de cône. Aucun problème de montage n'est apparu.

— La partie cylindrique de la peau est constituée de 20 viroles horizontales composées chacune de 12 tôles de 9,70 m de longueur et 1,95 m de hauteur pour les viroles courantes.

Chaque tôle est renforcée par un système de raidisseurs horizontaux et verticaux. Ces raidisseurs sont placés sur la face convexe, côté béton, ils sont destinés à reprendre la poussée du béton, la peau devant servir de coffrage intérieur (levées de béton de 2 m de hauteur). De plus, l'ancrage des tôles est réalisé par un quadrillage de connecteurs ou goujons soudés en quinconce tous les 30 cm.

En première tranche, la tolérance contractuelle de géométrie n'a pu être respectée (tôle située entre 2 cylindres à ± 50 mm du cylindre théorique). Les études ont toutefois montré que la géométrie était acceptable moyennant quelques modifications dans les parties en béton.

Diverses modifications concernant les raidisseurs et dispositions améliorant la géométrie au montage ont permis de réaliser la tranche 2 dans les tolérances et apparement sans difficulté technique.

— Les bords supérieurs de chaque virole sont positionnés ou retouchés par meulage de façon à respecter un plan horizontal à ± 2,5 mm.

— Une vérification constante de la rotundité, des la 1^{re} virole pour respecter des tolérances au plus égale à la moitié des tolérances contractuelles.

— 1 jeu de 2 poutres courbes raidisseuses plaquées sur les tôles côté intérieur utilisé ainsi :

Si l'on désigne par Vn la virole en cours de montage, les poutres raidisseuses sont posées sur Vn-2 et Vn-1. On procède alors comme suit :

- a) tôles virole Vn soudées sur Vn-1;
- b) transfert poutre raidisseuse de Vn-2 sur Vn;
- c) soudage Vn+1 sur Vn;
- d) transport poutre raidisseuse de Vn-1 sur Vn + 1 et ainsi de suite.

— Les poutres raidisseuses sont préassemblées au sol totalement et leurs dimensions vérifiées minutieusement avant utilisation sur l'ouvrage.

— à l'emplacement du sas matériel, les tôles sont soudées en cordon continu sans tenir compte de l'ouverture, celle-ci n'étant découpée qu'après que le bétonnage soit au niveau de la virole V 16. En plus, un renforcement par poutre et poteaux verticaux est exécuté au droit du sas.

La qualité d'étanchéité exigée pour la paroi de l'enceinte nécessite un contrôle soigné des soudures. Les 4 600 m de cordon, par tranche, ont été contrôlés systématiquement par ressuage et à la boîte à vide ; 2 p. 100 des soudures ont été radiographiées ainsi que la totalité des intersections de cordons et les soudures d'angle des traversées.

La vitesse d'exécution de cette peau, y compris contrôles, est d'environ une virole complète par semaine.

— La partie intermédiaire entre jupe et dôme est un tore, donc les éléments ont été préfabriqués au sol et montés en « opération de week-end » afin de réduire les embarras dus aux câbles et haubans avant clamage (1). Une période sans vent est naturellement préférable pour réaliser cette opération.

— Le dôme a un diamètre extérieur hors tout de 31,50 m. Il faut noter, à l'intérieur du bâtiment réacteur, la présence d'un pont tournant (diamètre de roulement 30,40 m, charge d'exploitation 1 500 kN) donc les éléments : poutres et 2 chariots (dont 1 provisoire permettant la manutention de la cuve du réacteur, de masse 300 t) ne peuvent être montés que par le dessus de l'enceinte, c'est-à-dire avant réalisation du dôme.

Dans le programme initial, le dôme métallique devait être construit sur une charpente prenant appui sur les poutres de pont tournant.

Pour maintenir une date admissible de mise à disposition du pont malgré un retard important dans les travaux de Génie Civil, notamment la construction du voile circulaire support du pont, il a été envisagé de préfabriquer le dôme au sol et d'en réaliser la mise en place après levage du pont tournant. Cette solution a été adoptée et n'a nécessité qu'une faible sur-longueur des tôles du tore pour le repos provisoire du dôme avant clamage (1) et soudure.

La méthode retenue a fait gagner 2 mois pour les essais à vide et 1 mois pour les essais en charge.

Initialement le pont devait être levé avec 2 grues, alors que le dôme n'en autorise qu'une. Cette solution n'a donc été possible que lorsqu'un engin capable fut disponible en Europe (grue Manibowok de l'entreprise belge Van Driessche).

(1) Présentation des tôles bord à bord avant soudure

Les caractéristiques des coils sont les suivantes :

a) Pont tournant

— Poutre : nombre : 2 ; masse unitaire : 42 t ; longueur : 35,2 m ; portée de grue pour levage 31 m, soit 1 300 t.m.

— chariot : nombre : 2 ; masse unitaire : 59 t ; portée de grue pour levage 23 m soit 1 350 t.m ; hauteur de flèche (verticalement) : 66 m.

b) Dôme (fig. 8)

— diamètre hors tout : 31,50 m, masse : 53 t ; portée de grue pour levage : 27 m, soit 1 430 t.m ; hauteur de flèche (compte tenu de l'élingage par « araignée ») : 72 m.

L'ensemble de ces levages, y compris montage et démontage de la grue, a duré une semaine pour chacune des tranches.

Deux difficultés se présentent à l'occasion du montage de l'engin : tout d'abord son emplacement au pied de l'enceinte, compatible avec l'approche des coils et la position du dôme au sol, et la possibilité de trouver un couloir de 80 m de long pour l'assemblage de la flèche au sol.

6.1.1.1 Enceinte - béton

Chaque enceinte est approximativement un cylindre de 37 m de diamètre et 55 m de hauteur. Le radier, d'épaisseur variable (1 m à 2,50 m) est en béton armé. La jupe (0,85 m d'épaisseur) et le dôme (0,75 m d'épaisseur) sont en béton précontraint.

— Le radier : 2 200 m³ de béton avec ferrailage dense est d'une réalisation encore alourdie par la présence de nombreux fers verticaux devant traverser la peau métallique pour transmettre les efforts verticaux entre les structures internes et la fondation. Ces armatures ont été soudées en usine, de chaque côté de fers plats courbes, lesquels sont arasés dans un plan horizontal précis pour assembler par soudure les tôles de la peau métallique.

Dans ce genre d'ouvrage, le choix du nombre de plots de bétonnage ne peut être qu'une solution de compromis entre le minimum de surfaces de reprise (difficulté de coffrage et repiquage) et le minimum de volume de béton à couler pour éviter le retrait. Le bétonnage a été exécuté en 4 plots (1 central et 3 secteurs).

Il faut noter également que la totalité du radier comporte sur sa face extérieure une épaisseur de 15 cm de béton poreux doublé d'une étanchéité multicouche avec feuille de Freiviny de façon à drainer toute fuite d'eau éventuelle provenant de l'intérieur du bâtiment.

— Le bétonnage de la jupe ne pose pas de problème particulier sinon la présence des quelques 150 traversées de l'enceinte positionnées avec précision.

Les levées sont de 2 m, avec 4 plots de bétonnage sur le périmètre, soit environ 50 m³ par plot. La cadence de bétonnage est rendue lente par la difficulté d'approche des bennes à béton sur la paroi, ce qui est favorable pour la tenue de la peau métallique. Le coffrage extérieur est de type grimpart.

La cadence de bétonnage est en moyenne d'une levée sur le périmètre, par semaine.



Fig. 8 Levage du dôme métallique préfabriqué, bâtiment réacteur, tranchée 2.

— Le béton du dôme a été coulé en 2 phases :

- l'une de 20 cm d'épaisseur reposant directement sur la tôle de la peau d'étanchéité ;
- l'autre de 55 cm coulée après que la couche précédente soit devenue porteuse et capable de reprendre, sans sujétion spéciale, le poids du béton avant prise.

Pour la 1^{re} phase, la peau métallique ne pouvait, à elle seule, reprendre les charges dues au bétonnage. Ces efforts pouvaient être compensés par :

- soit un étalement prenant appui sur le pont tournant (méthode réalisée à Tihange) ;
- soit une mise en pression de l'enceinte pendant toute la période de bétonnage et de début de prise du béton.

Pour ne pas immobiliser le pont et pour des raisons propres à Campenon Bernard, la 2^e solution a été retenue et mise en application avec succès.

Voici quelques précisions sur cette opération de 1^{re} phase :

Considérations théoriques

- Effort à reprendre : 500 kg/m²
- Surpression correspondante de l'enceinte : 85 g/cm²
- Volume de l'enceinte : 54 700 m³
- Temps de maintien de la surpression : 4 jours dont 1,5 jour pendant bétonnage et 2,5 jours pendant la prise jusqu'à atteinte d'une résistance de 50 bar.

— Conditions météorologiques :

Température extérieure variant de - 10 à + 15° C.

— Volume de béton : 250 m³

Considérations pratiques

— Sur la surpression :

Mise en œuvre de 5 compresseurs (2 diesels, 2 électriques) avec manomètres et alarmes sonores et surveillance permanente. En secours 1 diesel, 1 électrique ;

Obturation de 150 traversées de l'enceinte et du sas matériel ;
Interdiction totale de tous travaux à l'intérieur pendant la surpression sauf pour visite de sécurité en utilisant le sas personnel.

— Sur le bétonnage :

Mise en œuvre de béton chaud (décembre) avec toutes dispositions contre le froid pour la tranche 1.

Vidange des bennes avec précaution et avec cône de béton de hauteur maximum 50 cm ;

Coulage par anneaux concentriques en commençant par la périphérie ;

Bétonnage effectué en 37 heures. Au bout de 18 heures la résistance du béton mesurée au soléromètre pour la tranche 1 était de 70 bar et 195 bar après 30 heures.

La surpression a été supprimée 37 heures après le dernier bétonnage.

À noter que pendant le bétonnage, il a été mesuré un abaissement du dôme de l'ordre de 5 mm (mesuré au centre).

Toutes les opérations se sont également bien déroulées pour la tranche 2.

La précontrainte des enceintes est assurée :

— **Horizontalement** : par des câbles 12 T 15 espacés de 0,15 m, ancrés sur 4 nervures placées à 90° autour de la jupe, chacun d'eux ayant une longueur égale aux 3/4 du périmètre.

— **Verticalement** : par des câbles 12 T 15 espacés de 0,35 m, ancrés en partie basse sous le radier, en plafond d'une galerie circulaire et en partie haute soit sur l'acrotère pour les câbles verticaux purs (1 sur 3), soit sous l'acrotère, dans la jupe pour les câbles avec retour (2 sur 3), assurant la précontrainte du dôme. Ces câbles avec retour sont disposés sur le dôme suivant 3 directions à 120° C.

Cette précontrainte ne peut être terminée tant que l'entrée provisoire à l'emplacement du sas matériel permettant l'accès du gros matériel (générateurs de vapeur, cuve du réacteur) n'est pas reconstituée.

La position des quatre nervures verticales d'ancrage des câbles nécessite des réservations dans les bâtiments voisins pour le passage des tourets de câbles et du matériel de précontrainte.

Le programme général de construction ne permettant pas d'effectuer en série les opérations : entrée du matériel, fermeture du sas, précontrainte puis reconstitution des réservations, il a été prévu de précontraindre les câbles horizontaux en deux phases : tout d'abord le tiers supérieur à 100 %, le tiers médian en décroissant jusqu'à 0, puis une deuxième phase pour terminer la précontrainte de la partie basse après l'entrée du matériel.

Cette décomposition permet également de s'affranchir en partie des sujétions dues aux conditions météorologiques lorsque le programme général impose une précontrainte en hiver.

Actuellement, la première phase est en cours de finition pour l'enceinte tranche 1.

Des essais d'injection sur maquette à l'échelle 1 ont été effectués sur 2 câbles de chaque

famille, afin de mettre au point une méthode assurant le remplissage parfait des gaines, notamment celles des verticaux purs et verticaux avec retour. Ces essais sont concluants.

6.1.2 Les structures internes

Les structures internes, à l'intérieur de l'enceinte étanche, sont constituées de :

— un cylindre en béton armé de 29,50 m de diamètre, épaisseur variable de 0,60 à 1,00 m montant jusqu'à + 35,00 pour le supportage du pont tournant (coffrage grimpeur jusqu'à + 20,00, glissant de + 20,00 à + 35,00).

— deux planchers principaux à + 4,00 et + 20,00. Les trois éléments ci-dessus assurent les stabilités verticale et horizontale.

— le puits de cuve supportant le réacteur.

— des voiles rayonnantes formant « casemates » en secteur pour isoler le matériel (générateur de vapeur et pompe) de chacune des boucles du circuit primaire.

— le plancher et les voiles de la piscine interne (de + 7,50 à + 20,00).

Cette partie de l'ouvrage est très fortement ferrillée (en moyenne 200 kg/m³ d'acier et en certains points particuliers 500 kg/m³). Le façonnage et la mise en place de ces armatures ont constitué l'une des principales difficultés du chantier, en raison, d'une part, de l'exiguité de certaines cellules et, d'autre part, par suite des impératifs d'antisismicité de l'ouvrage contraignant à mettre en place des barres de 12 m de longueur, afin d'avoir le moins de recouvrement possible. L'armature du puits de cuve est renforcée par 26 câbles de précontrainte 12 T 15.

Une autre difficulté réside dans la complexité de l'ensemble (abondance des réservations, fourreaux, platines, etc...) et dans la précision exigée pour sa réalisation.

De plus, la présence des joints et la nécessité de clivage de certains planchers et autres éléments n'ont pas facilité la construction des structures internes.

À titre indicatif, la complexité de cet ouvrage est illustrée par son métré (ouvrage réglé par application d'un bordereau de prix). Ce métré comporte plus de 600 pages.

En première tranche, la découverte de ces difficultés, et le retard des plans de construction principalement dû aux différentes modifications et au manque de renseignements concernant l'accrochage des divers matériels, ont contribué au retard d'exécution de 4 mois sur le programme initial. En tranche 2, les délais ont été tenus, d'une manière générale.

6.2 Salle des machines

Par rapport aux centrales thermiques déjà construites en France, l'élément nouveau à Fessenheim se rapporte aux dimensions de ce bâtiment : 55 m en pignon, 90 m en long pan pour une tranche, 43 m de hauteur au-dessus du terrain naturel.

6.2.1 Béton

Le bâtiment est fondé sur semelles, sauf le massif du groupe dont le fond du radier est à - 8,00 m.

Le bâtiment est constitué de portiques principaux dans le sens du pignon, avec traverses intermédiaires à + 6,00 ou + 7,00 et plancher de service à + 15,50. L'étalement de ces poutres et planchers à forte charge (2 à 4 t/m²) a été réalisé par étais métalliques et tours télescopiques.

Les poteaux et la table du groupe turbo-alternateur (pour chacune des tranches) ont été construits en 5 mois. L'étalement de cette dernière, assez dense puisque devant supporter une charge de 4 000 t, se composait d'une charpente en profilés reposant sur des étais en treillis ou de tubes posés sur des boîtes à sable pour faciliter le décentrement.

La mise en place du béton - bétonnage continu pour la table du groupe - s'est faite principalement à la grue, quelquefois à la pompe.

6.2.2 Charpente

Elle est composée de portiques en treillis dans le sens du pignon ; bien que les poteaux supportent les ponts roulants de 1 700 kN, elle reste relativement légère (1 500 t pour les 2 tranches) mais les dimensions des fermes sont telles que deux grues tours ont été nécessaires pour leur mise en place d'une seule pièce : 1 engin au niveau 0,00, le long du long pan sur la même voie que la grue du bétonnier, l'autre engin se déplaçant parallèlement au précédent, mais sur le plancher à + 15,50.

Naturellement, une étude particulière a permis la coordination de l'avancement des deux chantiers (béton et charpente) de la tranche 1 vers la tranche 2.

Les fondations étant commencées en novembre 1971, les ponts ont été levés en janvier 1973, le bâtiment couvert en mai 1973 pour la tranche 1 et février 1974 pour la tranche 2.

6.3 Bâtiment des auxiliaires nucléaires

Le bâtiment des auxiliaires nucléaires est un bloc parallélépipédique de 46 m x 45 m, en béton armé jusqu'à + 12,00, surmonté d'un hall métallique d'environ 6 m de hauteur.

Il repose sur l'ensemble des galeries d'eau de circulation qui forment pratiquement radier alvéolaire.

Il est constitué de nombreux voiles et planchers en béton armé. Les épaisseurs des parois de salles ainsi formées sont définies par des considérations de protection biologique. Pour la partie béton, le volume des vides représente 63 %.

La partie métallique abrite les centrales de ventilation (soufflage et extraction-filtration).

La construction a duré 21 mois dont 2 pour la charpente, couverture et bardage des façades.

6.4 Les bâtiments - combustibles -

Ils sont fondés à $-7,50$ m. La majeure partie du bâtiment est occupée par la piscine de désactivation du combustible qui règne entre les niveaux $+5,70$ et $+20,05$. Les épaisseurs de parois des compartiments sont de $1,5$ m pour des raisons de protection biologique. Le volume total de la piscine est de 1500 m³. Ses parois sont revêtues d'une feuille d'acier inoxydable de 3 mm d'épaisseur soudée sur une ossature métallique inoxydable mise en place au moment du bétonnage ; de cette façon, une étanchéité parfaite est assurée.

Au-dessus de la piscine, le hall est en charpente métallique, avec un bardage étanche (feuille adhésive équivalente à celle d'un trou de $0,2$ cm² de bardage) isolé thermiquement ($K = 0,6$ kcal/h/m²/°C) pour réduire les phénomènes de condensation.

La présence de cette masse d'eau relativement haute au-dessus des fondations fait que, sous l'effet d'un séisme, les contraintes au sol peuvent atteindre 7 bar ; il faut cependant noter que nous avons affaire à un phénomène dynamique qui permet de considérer le terrain comme encore plus raide.

La construction du gros œuvre a été rendue difficile par la proximité du bâtiment réacteur et de la station de pompage provoquant ainsi l'exiguïté du chantier dans une zone de circulation.

6.5 Les bâtiments périphériques

Ce vocable désigne les bâtiments qui occupent l'espace entre le bâtiment « réacteur », d'une part, le bâtiment des auxiliaires nucléaires et les locaux électriques, d'autre part. Le rôle essentiel de ces bâtiments est de supporter les tuyauteries eau et vapeur principales et leurs organes de coupure. Ils comportent, par ailleurs, des galeries de câbles et d'autres matériels électriques.

La fonction support des tuyauteries eau et vapeur est l'élément de dimensionnement décisif, car le phénomène de rupture de tuyauteries ajouté au séisme applique un moment de renversement de 20000 t.m. Ce moment est équilibré par une semelle de $3,70$ m d'épaisseur.

6.6 Le bâtiment électrique

Situé entre le bâtiment des auxiliaires nucléaires et le bâtiment « réacteur », d'une part, et la salle des machines, d'autre part, ses dimensions gé-

nérales sont les suivantes : longueur 98 m, largeur $12,5$ m, hauteur au-dessus des fondations 25 m environ.

Le bâtiment est fondé, d'une part, sur semelles indépendantes, et d'autre part sur les galeries d'eau de circulation.

Le sous-sol est utilisé pour les passages des câbles et des tuyauteries. La salle de commande est placée au dernier niveau, soit $15,50$, elle communique directement avec le plancher de service de la salle des machines.

Elle est protégée contre les projectiles, et notamment ceux pouvant provenir d'une rupture de la turbine, par un surépaississement de son toit porté à 1 m moyen et par un mur en béton situé dans la structure de la salle des machines.

Les poteaux et poutres principales sont coulés en place. Les poutrelles et dalles de plancher sont préfabriquées afin de permettre des délais d'exécution plus courts, le chantier de ce bâtiment étant d'accès malaisé en raison de sa situation centrale.

7 LES EFFECTIFS

La courbe des effectifs de Génie Civil fait apparaître une moyenne de 350 hommes pour l'année 1972 , 475 pour l'année 1973 avec des pointes au-dessus de 500 (maximum à 540). Le nombre total d'heures de travail est environ de 2 millions.

La proximité des frontières suisse et allemande n'a pas favorisé le recrutement de personnel.

8 FINANCEMENT

Une société suisse (regroupant trois sociétés de production et de distribution d'électricité) et une société allemande (également productrice et distributrice d'électricité) contribuent au financement des deux tranches de la centrale. En contre partie elles disposeront respectivement de 15% et de $17,5\%$ de la puissance et de l'énergie produites par ces tranches dès leur mise en service.

Il est à noter que les accords passés avec ces sociétés prévoient réciproquement une contribution au financement par E.D.F. d'une part, pour la centrale nucléaire suisse qui doit être édifiée sur le Rhône à



Fig. 9 Vue vers le Nord-Ouest du belvédère provisoire.

Verbois près de Genève et d'autre part, pour la centrale nucléaire allemande prévue sur le Rhin près de Wyhl.

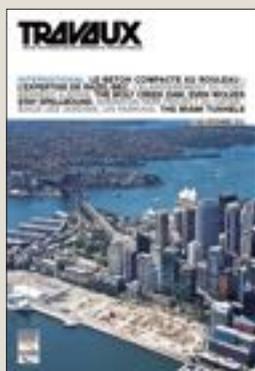
9 CONCLUSIONS

La construction du Génie Civil de la centrale nucléaire de Fessenheim a été réalisée dans les bonnes conditions et d'une manière générale, dans les délais prévus initialement, sauf en ce qui concerne les structures internes du bâtiment réacteur tranche 1. Ce retard de 4 mois a été provoqué en partie par la livraison tardive des plans de béton armé et en partie par la complexité des ouvrages (fig. 9).

Ce résultat a été obtenu, dans de bonnes conditions de sécurité et sans grandes difficultés techniques sinon les problèmes courants pour la réalisation d'ouvrages de ce type et de cette importance, grâce à la clémence relative des hivers $71-72$ et $72-73$, mais aussi grâce aux entreprises dont le dynamisme tant des responsables que des ouvriers a été remarquable et à la hauteur des moyens techniques mis à disposition.

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DE TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS



893 - INTERNATIONAL



894 - TRAVAUX SOUTERRAINS



895 - TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX



896 - OUVRAGES D'ART



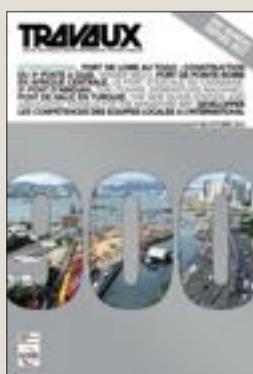
897 - SOLS & FONDATIONS



898 - SPÉCIAL BÉTONS



899 - VILLE DURABLE - ÉNERGIES NON POLLUANTES



900 - INTERNATIONAL



901 - TRANSPORTS, ROUTES ET TERRASSEMENTS



902 - SPÉCIAL STADES



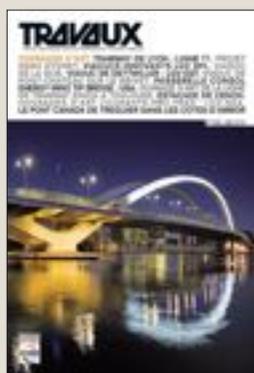
903 - PATRIMOINE & RÉHABILITATION



904 - TRAVAUX SOUTERRAINS



905 - TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX



906 - OUVRAGES D'ART



907 - SOLS & FONDATIONS

BON DE COMMANDE

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) :

- 893 x ___ 894 x ___ 895 x ___
 896 x ___ 897 x ___ 898 x ___
 899 x ___ 900 x ___ 901 x ___
 902 x ___ 903 x ___ 904 x ___
 905 x ___ 906 x ___ 907 x ___

Soit un montant total de :
_____ numéros x 25 € = _____ €

(Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 25 € à 20 € l'unité. Pour plus de 100 numéros commandés le prix est de 17 € l'unité. Pour les auteurs de la revue le prix est de 15 € l'unité.)

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



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

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

La CNETP regroupe **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à plus de **267 000 salariés**.

Nos coordonnées :

- **Par courrier :**
31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- **Par Internet :** www.cnetp.fr
- **Par fax :** 01.70.38.08.00
- **Par téléphone :**
 - pour les entreprises : 01.70.38.07.70
 - pour les salariés : 01.70.38.07.77
- **Serveur vocal (24h/24) :** 01.70.38.09.00



RÉPERTOIRE DES FOURNISSEURS

TRAVAUX

DEPUIS 1917, LA REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Nous vous invitons à découvrir prochainement dans **TRAVAUX**, une nouvelle présentation du répertoire des fournisseurs de matériels, équipements ou services. Des rubriques simplifiées pour une meilleure identification des métiers, nouveaux formats publicitaires pour optimiser la lisibilité des annonceurs. Nous sommes à votre disposition pour vous commenter et réserver l'emplacement publicitaire de votre choix.

Pour réserver contactez Rive média :

Bertrand COSSON

Tél. 01 42 21 89 04

b.cosson@rive-media.fr

Carine REININGER

Tél. 01 42 21 89 05

c.reininger@rive-media.fr

PRO BTP & moi

Ensemble pour protéger
la santé de mes salariés

Éric, 53 ans

*Patron d'une PME
du BTP*



3 millions de personnes assurées
par PRO BTP en **complémentaire santé**

www.probtp.com

PRO BTP
GROUPE