

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

ENERGIE. ARCHE DE CHERNOBYL. VALORISATION DU BIOGAZ A PARTIR DES STOCKAGES DE DECHETS. SURETE DES CENTRALES NUCLEAIRES - LES DIESELS D'ULTIME SECOURS (DUS). VERS UNE AUTONOMIE 100% RENOUEVELABLE DES ZONES NON INTERCONNECTEES A L'HORIZON 2030. LGV BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE. INSTALLATION NUCLEAIRE ICEDA DU BUGEY (AIN). RESEAUX DE CHALEUR ET DE FROID. DOUBLE SMART GRID A L'ECHELLE D'UN ILOT URBAIN. FERME SOLAIRE DE COLEAMBALLY EN AUSTRALIE

N° 951 JUIN 2019



L'ARCHE
DE CHERNOBYL
© FRANCIS VIGOUROUX

LES TRAVAUX
PUBLICS FEDERATION
NATIONALE



BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.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**
Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard
Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland
(Fntp), Florent Imbert (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Léon Grosse),
Romain Léonard (Demathieu Bard),
Claude Le Quéré (Egis), Véronique
Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau
(Soletanche Bachy), Jacques Robert
(Arcadis), Solène Sapin (Bouygues
Construction) Claude Servant (Eiffage tp),
Philippe Vion (Vinci Construction Grands
Projets), Nastaran Vivan (Artelia),
Michel Morgenthaler (Fntp)**Ont collaboré à ce numéro**
Rédaction
Monique Trancart (actualités),
Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. 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**Directeur de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée**
Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.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).Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0218 T 80259
ISSN 0041-1906

LA PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DE L'ÉNERGIE : DES OBJECTIFS AMBITIEUX, DES MESURES CONCRÈTES QUI RESTENT À DÉFINIR



© DR

Le Ministère de la transition écologique et solidaire a dévoilé fin janvier son projet très attendu de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Son objectif : cadrer la politique énergétique de la France jusqu'en 2028, avec en ligne de mire l'objectif de neutralité carbone en 2050. Si le projet laisse un goût d'inachevé et ne satisfait pas l'ensemble des filières, il a le mérite de tracer une voie pour mettre en mouvement l'ensemble des acteurs.

Dans la multitude d'objectifs qui s'imposent au secteur de l'énergie (réduction du nucléaire, augmentation de l'efficacité énergétique, développement des renouvelables, ...), la PPE affiche une priorité claire : diminuer fortement notre dépendance aux énergies fossiles pour atteindre zéro émissions nettes de gaz à effet de serre en 2050.

Pour cela le document mise sur trois leviers :

- La réduction de la consommation finale d'énergie de 7 % en 2023 et 14 % en 2028. Assez logiquement le bâtiment et le transport sont identifiés comme des secteurs cruciaux pour atteindre cet objectif.
- L'électrification des usages, notamment dans le secteur des transports.

- La diversification des sources d'énergie et le développement ambitieux des énergies renouvelables. Pour la production d'électricité, la PPE mise avant tout sur les technologies matures, aujourd'hui plus compétitives. Le solaire photovoltaïque et l'éolien terrestre voient ainsi leurs capacités installées multipliées respectivement par 5 et 2,5 en 2028 par rapport à 2017. La chaleur renouvelable progresse de 40 à 60 % par rapport à 2016.

La réussite de ce plan dépendra de notre capacité collective à orienter les financements et déclencher les actions et investissements identifiés par la PPE : rénovation thermique des bâtiments, véhicules à basses émissions, déploiement des bornes de recharge, électricité verte, déploiement et numérisation des réseaux, développement du stockage de l'électricité à grande échelle... À ce stade, la PPE propose peu de mesures concrètes pour atteindre ses objectifs.

Or l'enjeu est de taille : selon le think tank I4CE, le déficit d'investissement dans ces secteurs entre 10 et 30 milliards d'euros annuels. Ces montants pourraient être largement couverts par une redirection des financements des investissements fossiles vers des investissements bas-carbone (toujours selon I4CE, plus de 70 Mds€ sont investis chaque année dans la production et la consommation d'énergie fossile). Dans un contexte de moyens budgétaires limités, le choix et la priorisation des investissements sont essentiels pour que la transition soit efficace et acceptée socialement. La valeur de l'action pour le climat établie par la Commission de France Stratégie présidée par Alain Quinet peut ainsi constituer une référence commune et un guide pour ces choix d'investissement. Reste maintenant à intégrer plus systématiquement cette valeur - fixée à 250€₂₀₁₈/tCO_{2e} en 2030 - dans les choix d'investissement publics et privés et à la traduire dans les politiques publiques (normes, subventions, garanties, fiscalité).

BÉRENGÈRE MESQUI

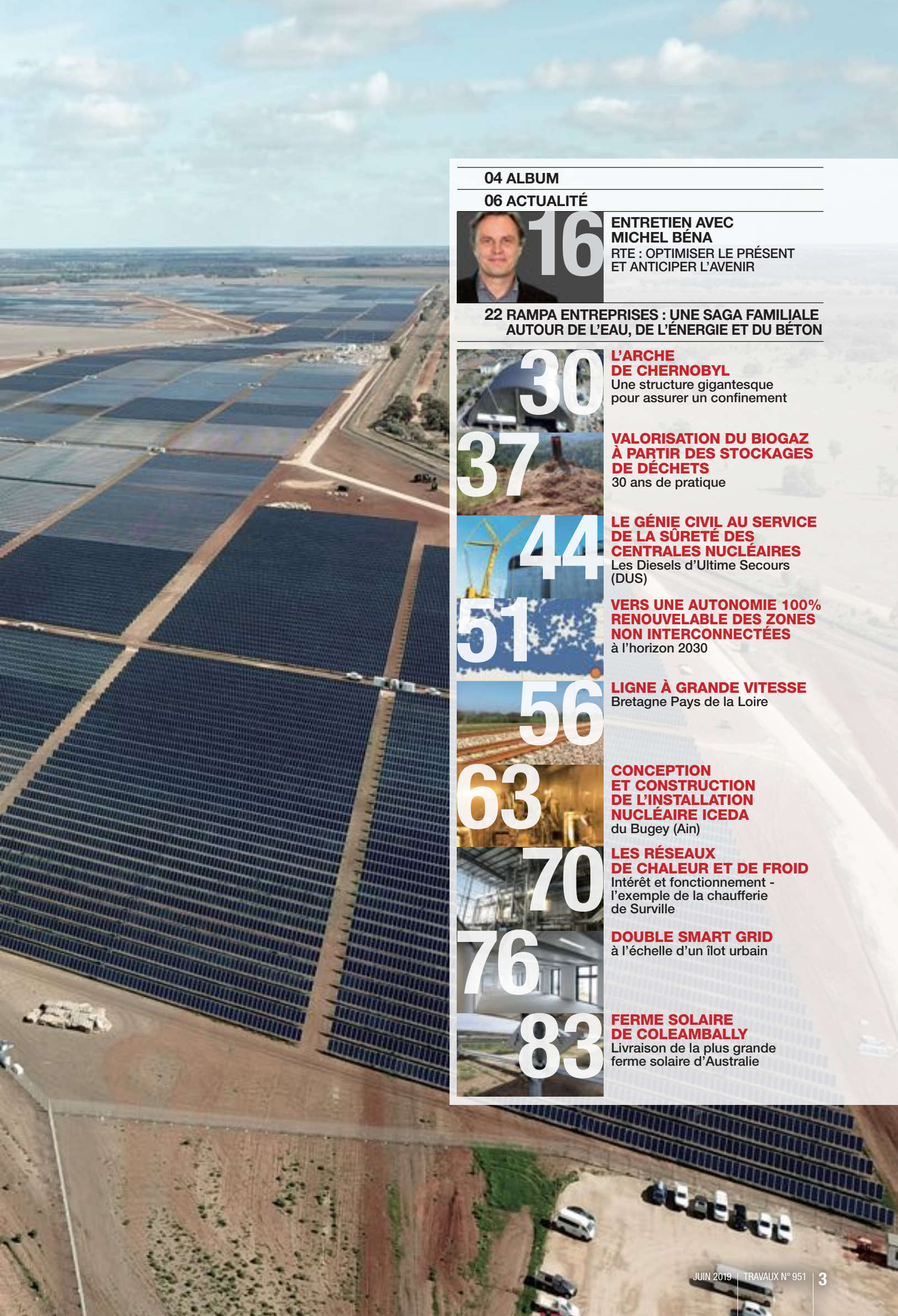
DIRECTRICE DU DÉPARTEMENT
DÉVELOPPEMENT DURABLE ET NUMÉRIQUE,
FRANCE STRATÉGIE



ÉNERGIE

FERME SOLAIRE DE COLEMBALLY EN AUSTRALIE © BOUTIGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA





04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



16

**ENTRETIEN AVEC
MICHEL BÉNA**

RTE : OPTIMISER LE PRÉSENT
ET ANTICIPER L'AVENIR

22 RAMPA ENTREPRISES : UNE SAGA FAMILIALE
AUTOUR DE L'EAU, DE L'ÉNERGIE ET DU BÉTON



30

**L'ARCHE
DE CHERNOBYL**

Une structure gigantesque
pour assurer un confinement



37

**VALORISATION DU BIOGAZ
À PARTIR DES STOCKAGES
DE DÉCHETS**

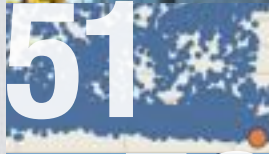
30 ans de pratique



44

**LE GÉNIE CIVIL AU SERVICE
DE LA SÛRETÉ DES
CENTRALES NUCLÉAIRES**

Les Diesels d'Ultime Secours
(DUS)



51

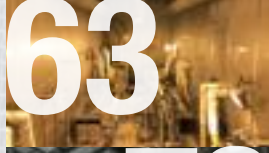
**VERS UNE AUTONOMIE 100%
RENOUVELABLE DES ZONES
NON INTERCONNECTÉES**

à l'horizon 2030



56

LIGNE À GRANDE VITESSE
Bretagne Pays de la Loire



63

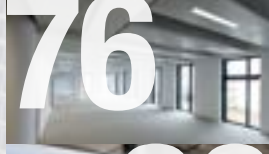
**CONCEPTION
ET CONSTRUCTION
DE L'INSTALLATION
NUCLÉAIRE ICEDA**
du Bugey (Ain)



70

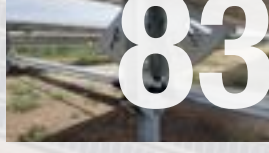
**LES RÉSEAUX
DE CHALEUR ET DE FROID**

Intérêt et fonctionnement -
l'exemple de la chaufferie
de Surville



76

DOUBLE SMART GRID
à l'échelle d'un îlot urbain



83

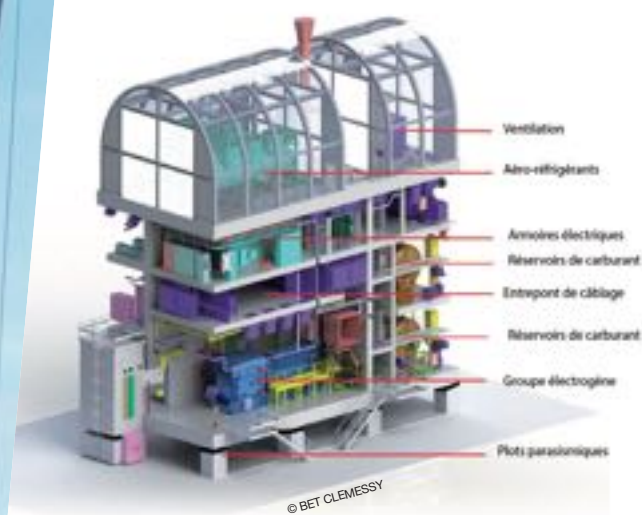
**FERME SOLAIRE
DE COLEAMBALLY**

Livraison de la plus grande
ferme solaire d'Australie



QUAND ON APPELLE LE DIESEL AU SECOURS

Léon Grosse réalise 20 des 58 DUS (Diesel d'Ultime Secours) sur 5 centrales nucléaires françaises. Ces installations ont été prescrites par l'Autorité de Sécurité Nucléaire suite à l'accident de Fukushima au Japon en 2011. Les DUS, installés dans des bunkers, permettent de fournir l'électricité pour assurer les fonctions vitales de refroidissement en cas d'avarie majeure consécutive à une agression naturelle extrême. (Voir article page 44).



LA GÉOTHERMIE PROFONDE DEVIENT MOINS EXCEPTIONNELLE

La géothermie profonde produit de l'électricité et de la chaleur en grande quantité. La Guadeloupe et l'Alsace développent ces installations, témoignant que cette énergie renouvelable s'appuie sur des bases de plus en plus solides.

© FONROCHE GÉOTHERMIE



Forage de deux puits à plus de 4 000 m de profondeur à Vendenheim (Bas-Rhin). L'eau à plus de 200°C sera turbinée dans une centrale électrique en construction.

Le chantier de la centrale électrique sur géothermie de Vendenheim (Bas-Rhin) a démarré en mai. Fonroche va y produire de l'électricité à partir d'une eau à 200°C à plus de 4 000 m de profondeur, au rythme de 350 m³/heure, voire plus. La livraison de kilowattheures au réseau commencera début 2020⁽¹⁾.

Ce sera la 1^{re} installation commerciale de ce type à fonctionner en métropole. Implantée dans l'Écoparc rhénan, la centrale de 12 MW fournira l'équivalent de l'électricité consommée par 12 000 logements. Elle produira aussi de la chaleur - 40 MW de puissance thermique - destinée notamment au réseau urbain de l'agglomération de Strasbourg.

« Nous avons intégré le savoir-faire de forage en interne afin de ne plus être dépendants des soubresauts de la filière pétrolière, précise Olivier Heckel, directeur régional de Fonroche Géothermie, responsable pôle surface. Nous avons acheté une foreuse automatique qui comporte peu de risques, est peu bruyante, sans émergence sonore de jour et de 5 dB(A) la nuit. »

L'Alsace abrite aussi le pilote de Soultz-sous-Forêts (Haut-Rhin, 200°C, 5 000 m) mis en service en 2008⁽²⁾ géré par Exploitation minière de la chaleur⁽³⁾.

Électricité de Strasbourg prévoit de mettre en service la centrale d'Illkirch (Bas-Rhin) de 26 MW en 2021. L'entreprise cartographie en 3D le sous-sol jusqu'à 3 000 m de profondeur⁽⁴⁾.

→ **La Guadeloupe, toujours en tête**

La Guadeloupe, en pointe sur la géothermie "haute énergie", monte en puis-

sance. Elle se prépare à multiplier par trois la puissance électrique tirée de son sous-sol volcanique, fracturé naturellement. La centrale de Bouillante (15 MW, 250°C) devrait être dotée d'une turbine supplémentaire de 10 MW grâce à de nouveaux forages à plus de 1 000 m de profondeur⁽⁵⁾. De plus, Ormat Technologies qui a repris l'installation en juillet 2016 avec la Caisse des dépôts et le BRGM, envisage d'exploiter un réservoir au nord de la baie de Bouillante avec une turbine de 20-25 MW vers 2023.

Au sud du département, à proximité de Vieux-Habitants, Teranov doit commencer des forages exploratoires en 2019 en vue d'une puissance électrique de 30 MW. Cette installation s'inscrit dans le programme Geotref, piloté par Teranov et Kidova, soutenu par le plan d'investissements d'avenir. Geotref est une plateforme d'innovation pour mieux connaître le fonctionnement des réservoirs fracturés.

Ces développements devraient permettre d'atteindre les objectifs de la filière pour 2023 : ajouter 53 MW. « Les projets qui sortiront de terre, seront les démonstrateurs de la solidité financière de la géothermie, » écrit Observ'ER dans son *Baromètre 2018 des énergies renouvelables électriques en France*.

→ **Mieux connaître le potentiel du sous-sol**

Cette progression peut toutefois être ralentie par « une connaissance encore insuffisante des ressources potentielles

du sous-sol français et le coût des forages qui reste élevé, » tempère Philippe Laplaige, expert géothermie à la direction production et énergies durables de l'Ademe. La centrale et les forages de Vendenheim coûtent 80 millions d'euros.

Autre obstacle : l'acceptation par la population. L'Ademe insiste sur la consultation le plus en amont possible du public. Fonroche a installé un important suivi micro-sismique du sous-sol et une protection de la nappe d'eau potable. Le Syndicat des énergies renouvelables (Ser) veut conforter la filière. « Nous demandons à avoir plus de perspective sur la géothermie électrique profonde dans le projet de Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), » a indiqué Jean-Louis Bal, président du Ser qui a son mot à dire dans la PPE pour 2023 et 2028. Le texte n'est pas attendu avant la fin de l'été, une fois présenté en conseil des ministres puis au parlement.

www.geothermieprofonde.info,
www.energies-renouvelables.org ■

⁽¹⁾ Vente sur le marché de l'électricité.

⁽²⁾ Cf. *Travaux* n°894, janvier-février 2013, page 10, n°926, septembre 2016, page 9.

⁽³⁾ GEIE Électricité de Strasbourg (67 %) et EnBW (33 %).

⁽⁴⁾ *Baromètre des énergies renouvelables électriques en France*, Observ'ER.

⁽⁵⁾ Cf. dossier géothermie profonde, *Ademe et vous, le mag*, n°122, janvier-février 2019.

SCHÉMAS DE RENFORCEMENT DES RÉSEAUX POUR ACCUEILLIR PLUS D'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE

À fin 2018, toutes les régions de France métropole avaient validé un schéma de développement des énergies renouvelables électriques d'ici à 2020, élaboré par le Réseau de transport d'électricité (RTE) et tenant compte des objectifs déclarés par les collectivités. Ceci afin que le réseau électrique puisse accueillir la production des installations de plus de 80 kW, selon le *Baromètre 2018 des énergies renouvelables électriques en France*⁽¹⁾.

RTE réalise ces schémas régionaux de raccordement au réseau des énergies

renouvelables (S3REnR) avec les distributeurs d'électricité.

→ **Partager les coûts entre les projets**

Les S3REnR garantissent des capacités d'accueil sur le réseau : collecte, distribution locale ou transfert au réseau de transport. Pour cela, il peut être nécessaire de renforcer des lignes ou d'en créer de nouvelles et des postes sources. Le renforcement est à la charge des gestionnaires tandis que les créations relèvent des producteurs qui se partagent les coûts selon une quote-part. Grâce à

ce système, l'adaptation du réseau ne pèse pas que sur le premier projet d'EnR raccordé. Elle est répartie sur l'ensemble déclaré par la région.

→ **Carte des puissances d'EnR prévues**

Le *Baromètre* publie la carte RTE des puissances prévues dans les S3REnR et le montant en euros de l'adaptation du réseau par mégawatt d'EnR⁽²⁾. ■

⁽¹⁾ Cf. pp 125-126. Document téléchargeable sur www.energies-renouvelables.org.

⁽²⁾ Les régions ont été étudiées avant leur fusion.

© RTE-SEIGNETTELAFONTAN.COM



Ligne très haute tension entre Reims (Marne) et Charleville-Mézières (Ardennes) pour l'intégration d'énergies renouvelables dans la région.

GRANDS PROJETS D'INFRASTRUCTURES : MIEUX FAIRE FACE AUX ALÉAS



© JEAN-FRANÇOIS MALBOUSSIN/RATP

Opération de ripage sur le prolongement de la ligne de métro n°11 à l'est de Paris.

Plus de deux cents personnes ont assisté à la journée scientifique et technique du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS), le 21 mars, sur les grands projets d'infrastructures en région parisienne⁽¹⁾. Trois thèmes ont été développés : soutènements pendant le chantier, impacts des travaux sur le bâti et instrumentation. Il a été question de trois réseaux : le Grand Paris Express (GPE), le prolongement de la ligne de train Éole et de lignes du métro parisien.

Dans le public et parmi les intervenants, beaucoup de jeunes et de femmes, signe que la profession se renouvelle. Et aussi des maîtres d'ouvrage comme le souhaite le CFMS.

« Nous sommes dans une phase d'ajustement du calendrier du Grand Paris Express pour une meilleure maîtrise des aléas, il sera connu cet été, » a indiqué d'entrée de jeu Thierry Huyghues-Beaufond, responsable unité infrastructures et méthodes constructives de la Société du Grand Paris.

Certaines formes de marché changent. Les 50 km de souterrain du bouclage de la ligne 15 du GPE par l'ouest et l'est⁽²⁾ seront réalisés en marché conception-réalisation. Des contrats de maîtrise d'œuvre vont donc être résiliés.

Un nouvel assistant à maîtrise d'ouvrage sera désigné en septembre. Les travaux seront notifiés en 2024.

→ Toujours avoir un plan B

SNCF Réseau n'aime pas du tout ces décalages de travaux : « Je déteste la mécanique des sols car elle est porteuse de risques pour la maîtrise d'ouvrage, a déclaré, plaisantant à demi, Cédric Kervella, directeur de l'agence du Grand Paris. L'impact des travaux est inacceptable en cas d'imprévu. Nous introduisons les chantiers dans les grilles horaires des trains, à l'avance. Il faut toujours avoir un plan B. Les maîtres d'œuvre sont trop concentrés sur une seule solution. L'enregistrement des données de surveillance n'est pas assez fiable. »

→ Progrès à faire en bétonnage

La RATP craint moins les décalages : « Nos ouvrages sont comme des concessions à perpétuité, un retard d'un mois ou d'un an, c'est très relatif pour nous, » a témoigné Pierre Florent, délégué du directeur d'opération du prolongement de la ligne 11 de métro. « Il y a plus d'études géotechniques en études et en travaux qu'il y a une vingtaine d'années, note-t-il. La maîtrise d'œuvre, grâce à la 3D et à des calculs très poussés, est plus proche de la réalité. Les entreprises font plus

de suivi. Peut-être y a-t-il même trop de détails. La géotechnique doit aider à prévoir et à identifier ce qui ne peut pas l'être. »

Moins de ferrailage, des progrès en coffrage et en bétonnage abaisseraient les coûts, ajoute Pierre Florent.

→ Surveillance par satellite

L'auscultation a fait un saut en 2014, selon Martin Beth, directeur de Sixense Soldata France. Les mesures par inclinomètres sont plus fréquentes, la surveillance, plus automatique. « Les inclinomètres doivent être utilisés avec amour, soigneusement, remarque-t-il. Un capteur répond à une question, sinon pas de capteur. »

La surveillance par satellite se développe (interférométrie). Tre Altamera a dressé un historique des mouvements de sols 1992-2015 sur 1 km de large autour du GPE de 1992 à 2015 afin de le confronter aux images actuelles tous les onze jours.

Interventions sur :
www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms ■

⁽¹⁾ Ifsttar, Champs-sur-Marne (Seine-et-Marne).

⁽²⁾ Lien par le nord entre Pont-de-Sèvres (Hauts-de-Seine) et Champigny-Centre (Val-de-Marne).

LA RN2 À QUATRE VOIES AU NORD

Plusieurs centaines de millions d'euros vont être consacrés à la mise à deux fois deux voies de la route nationale 2 entre Laon (Aisne) et Avesnes-sur-Helpe (Nord), a fait savoir Élisabeth Borne, ministre des Transports, à la mi-avril.

La RN2 est déjà en grande partie élargie au sud, vers la région parisienne.

Élus et représentants de l'État se sont mis d'accord pour réserver une 1^{re} enveloppe de 17,2 millions d'euros (État/région) à des études préalables dans l'Aisne.

Les priorités devaient être définies en juin, à la 1^{re} réunion du comité de pilotage du projet.

Cette transformation de la RN2 s'inscrit dans le désenclavement des territoires traversés. Elle a été impulsée par la signature du pacte pour la réussite de la Sambre-Avesnois-Thiérache par le Président de la République, en novembre dernier.



© FRANÇOIS-XAVIER DESSIFIÈRE

Tronçon de la RN2 à Étréaupont (Aisne) encore à deux voies.

INTERMAT EN 2021

Le prochain Intermat, salon des matériels, équipements, techniques et matériaux pour la construction et les infrastructures, se tient du 19 au 24 avril 2021 au parc des expositions de Paris-Nord-Villepinte (Seine-Saint-Denis).

<http://paris.intermatconstruction.com>

LYON-TURIN : LES ACCÈS À L'ÉTUDE

SNCF Réseau a lancé les études de réalisation des voies d'accès au tunnel Lyon-Turin. Premier point : cet été. Les études déboucheront sur une programmation des sections à construire et un schéma directeur de la ligne Dijon-Modane (Savoie) qui conduit aux abords du tunnel transfrontalier*. Cette ligne palliera l'augmentation du trafic de fret en attendant le tunnel et de celui des voyageurs. L'heure est « aux optimisations nécessaires du réseau existant avant la réalisation de lignes nouvelles », écrit le ministère des Transports. Les idées des élus locaux sont bienvenues au sein du comité de pilotage du programme d'études.

* Cf. Travaux, n°921, janvier-février 2016.

14000 JEUNES À RECRUTER PAR AN

Les travaux publics ont besoin de recruter 14000 jeunes par an d'ici 2025, en priorité par l'apprentissage. « Les TP sont des métiers d'avenir et pas seulement parce que nous recrutons (actuellement, NDLR), souligne Bruno Cavné, président de la FNTP qui a dévoilé son contrat d'études prospectives sur la formation fin mars. Notre secteur souffre d'un déficit d'attractivité qui n'a pas lieu d'être. »

En 2025, les salariés de plus de 55 ans seront plus nombreux que ceux de moins de 30 ans. Le numérique va renouveler la conduite des chantiers.

Mais cela ne provoque « aucune rupture du modèle économique et social à l'horizon 2025 et les compétences "traditionnelles" restent indispensables. »



© GÉRARD ROLLAND/OSGP

Chantier de la station Vitry-Centre (Val-de-Marne) du Grand Paris Express.

LES ÉQUIPEMENTS POUR LA CONSTRUCTION CONTINUENT SUR LEUR LANCÉE



© METALLIANCE

Engin d'alimentation de tunnelier fonctionnant sur batteries électriques.

« La production française des équipements pour la construction, les infrastructures, la sidérurgie et la manutention, a encore progressé en 2018, » a informé Jean-Claude Fayat, président du Cisma qui représente les entreprises fabricant en France⁽¹⁾. Après avoir augmenté de 11,6% en 2017, cette production a encore gagné 8,6% en 2018, soutenue par la bonne santé du BTP et de la manutention.

L'ensemble a réalisé 9,2 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2018 dont 5 en manutention (54%), 3,6 en BTP (39%) et 644 millions en sidérurgie-fonderie (7%).

Les importations progressent davantage que l'exportation. En cause notamment : l'absence de fabricant français de tunneliers et de foreuses.

En BTP, la production française s'exporte plus qu'avant vers l'Allemagne (+10%), l'Italie (+13%), le Royaume-Uni (+9%), la Belgique et la Pologne. En revanche, elle est beaucoup moins partie vers les États-Unis en 2018 qu'en 2017 : -22% contre -3%. Ce secteur du Cisma se rapproche du niveau de 2007, avant la crise de 2008.

La manutention n'en est pas encore là mais chariots, nacelles, rayonnage et

systèmes de charges isolées (entrepôt) se portent bien avec +10% en 2018. Par exemple, Manitou réalise 1,9 milliard d'euros dans le monde en 2018, contre 1,1 milliard en 2013, et prévoit 2,1 milliards en 2019. Il fabrique pour 60% en France, en particulier les chariots télescopiques.

Les engins de manutention trouvent preneurs surtout en Europe. L'Asie-Pacifique régresse tandis que l'Amérique progresse (+11%).

→ Nacelle extérieure 100% électrique

De plus en plus de matériels fonctionnent à l'électricité. Les chariots élévateurs sont depuis longtemps équipés de batteries au plomb parce qu'ils circulent à l'intérieur de locaux. Still opte progressivement pour des batteries au lithium-ion (1/2 charge en trente minutes) ou à l'hydrogène (entrepôt Carrefour à Vendinle-veil, Pas-de-Calais).

Même en extérieur, l'électricité trouve sa place. Manitou propose une nacelle 100% électrique.

En BTP, les travaux souterrains gagnent à être électrifiés. Metalliance, membre du Cisma, produit des équipements de logistique de tunnelier (apport en matériels) : « Nous allons directement vers

l'électrique sans passer par des moteurs hybrides à cause des contraintes d'atmosphère en sous-sol, a précisé Patrick Dubreuille, directeur général. Nous avons fait des essais avec une batterie lithium-ion-fer-phosphate en tunnel. Nous commercialisons ces machines depuis le chantier du métro de Rennes en 2018. »

→ Foreuse sans fil

Liebherr a présenté sa foreuse pour pieux sans fil au salon Bauma (Munich, avril) et va l'utiliser sur un chantier en Autriche cet été.

La LB16 sur batterie a les mêmes performances que le même modèle en diesel : jusqu'à 1500 mm de diamètre et 34,5 m de profondeur. Peu polluante, elle convient pour les travaux en ville. Elle émet 104 dB au lieu de 111. Elle peut travailler dix heures d'affilée. Elle se recharge sur une prise du chantier mais le temps de charge dépend de l'intensité du courant (32 A, 63 A ou 125 A). ■

⁽¹⁾ Ces entreprises peuvent être des filiales de groupes étrangers. Le Cisma est membre de la Fédération des industries mécaniques. Le Seimat, qui diffuse aussi ses chiffres, regroupe les importateurs de matériel et est rattaché à la Fédération des entreprises internationales de la mécanique et de l'électronique.

15^e CONCOURS EUROSPAN : 9 VILLES À L'ÉTUDE



© PORT JÉRÔME-SUR-SEINE & CAUX SEINE AGGLO

Port Jérôme-sur-Seine (Seine-Maritime) veut améliorer son entrée et concilier industries et ville.

Architectes, urbanistes, paysagistes de moins de 40 ans ont jusqu'au 29 juillet pour rendre leur conception du réaménagement de 9 sites en France. Ces sites ont été proposés par des collectivités locales et retenus en octobre 2018 par Europan France, concours du Plan urbanisme construction architecture⁽¹⁾. La 15^e édition du concours a pour thème "les villes productives" (mixité activités-habitat) comme la 14^e. Trois équipes seront finalement sélectionnées en décembre et continueront de

travailler avec les collectivités début 2020.

Les professionnels vont donc, par exemple, étudier l'entrée de ville de Port-Jérôme-sur-Seine à Notre-Dame-de-Gravenchon (Seine-Maritime).

→ Activités en milieu rural

À Aubry (Nord), le projet consiste à relier rives nord et sud du canal de la Haute-Deûle. La commune a des friches issues de son passé minier. Reliée par le train à Lille (30 km), elle peut attirer des habitants.

Dans le Pays de Dreux (Eure-et-Loir), il s'agit de créer ou de réhabiliter des quartiers d'activité en milieu rural sur 3 communes.

L'agglomération de Saint-Omer (Pas-de-Calais), entre Calais et Lille (Nord), veut reconnecter ses 5 communes autour du thème de l'eau, notamment par une meilleure interface entre villes et marais. La réflexion urbanistique porte sur 84 ha. Autres sites de la 15^e édition : Rochefort (bords de la Charente), Marseille (quartier ancien de la Cabucelle), Floirac (remaillage urbain, Bordeaux métropole).

En région parisienne : Champigny-sur-Marne (voie de desserte orientale, Val-de-Marne), Romainville (habitat et activités, Seine-Saint-Denis).

→ Recherche communes

Le thème de la 16^e édition sera décidé en novembre. En attendant, la structure recherche déjà des communes qui veulent un appui pour réfléchir à l'évolution de leur territoire.

En savoir plus :

www.europanfrance.org ;
www.urbanisme-puca.gouv.fr ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°943, juillet-août 2018, n°923, avril-mai 2016, n°909, octobre 2014.

SÉCURISER LES PASSAGES À NIVEAU SANS OUVRAGES D'ART

Il restait 155 passages à niveau à sécuriser fin 2018 sur 457 en 1997.

Le gouvernement cherche des solutions autres que la construction d'un pont ou d'un passage sous voie ferrée, jugée trop chère - 10-20 millions d'euros/ouvrage - et pas assez rapide à mettre en œuvre.

L'État a consacré 32 millions d'euros à la sécurisation en 2018 et entend monter à 45 en 2022.

Le rapport de Laurence Gayte, parlementaire, a servi de base à un plan d'actions dévoilé fin avril. Voici quelques mesures retenues lors du comité de suivi de la sécurité ferroviaire impliquant les acteurs concernés.

→ Diagnostics

Chaque passage à niveau fera l'objet d'un diagnostic ferré et routier, avec une meilleure prise en compte de l'environnement, en particulier la visibilité sur la route.

Les passages à crois Saint-André deviendront automatiques avec barrières.

Des expérimentations seront lancées en signalisation, lumineuse et au sol.

→ Commissions nationale et départementales

La prévention a sa place dans ce plan pour ne pas trop dépenser : plus sanctionner les excès de vitesse aux passages, ralentir davantage la circulation avant le franchissement, intensifier la formation du public.

Enfin, une commission nationale des passages à niveau sera créée fin 2019 ainsi que des commissions départementales.

www.ecologique-solidaire.gouv.fr, communiqué du 3 mai. ■



© CHRISTOPHE PETIT - TESSON-CAPA PICTURES/CFRÉSEAU

Modernisation de la ligne Granville (Manche)-Paris en 2015.

3^e ET 4^e VOIES FERRÉES PRÈS DE MANTES

Deux voies vont être ajoutées sur la plate-forme ferroviaire entre Guerville et Mantes-la-Jolie (Yvelines). La première de 3 km supprimera le goulot d'étranglement en amont de la gare de Mantes lié au prolongement de la ligne Éole jusque là en 2024. La seconde, de 2 km, sera posée en vue de la Ligne nouvelle Paris Normandie, de Paris à Yvetot (Seine-Maritime) en trains rapides, en 2030.

Egis, en groupement avec Razel-Bec, Franki et ETPO, a remporté le marché de maîtrise d'œuvre du génie civil de cet élargissement.

Les travaux ont lieu dans une zone inondable, bombardée pendant la Seconde guerre mondiale, avec des trains roulant jusqu'à 160 km/h à proximité. Durée : trois ans.



© EGIS

Plate-forme qui sera agrandie en amont de Mantes-la-Jolie (Yvelines).

SUEZ CÈDE SA MAINTENANCE NUCLÉAIRE

Endel a repris l'activité maintenance nucléaire de Suez, début 2019.

La filiale d'Engie, déjà investie dans ce domaine, peut ainsi étoffer ses services sur les circuits primaires et secondaires des centrales.

L'activité employait 180 personnes chez Suez et réalisait 28 millions d'euros de chiffre d'affaires (2017).

**KOWEIT :
OUVRAGE
MARITIME
DE 48,5 km**

Systra a conçu le tronçon principal du pont Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah inauguré le 1^{er} mai au Koweït. Il s'insère dans un ouvrage de 48,5 km qui relie Kuwait City à Subiyah en 36,1 km (main link) auxquels s'ajoutent 12,4 km vers Doha.

La liaison principale comprend un pont maritime de 26,4 km dont un ouvrage à haubans de 340 m, un pont terrestre, deux îles artificielles, deux polders et deux marinas, ainsi que des bâtiments. Systra a réalisé les études du pont principal pour le consortium formé par le Sud-Coréen Hyundai E&C et le Koweïtien CGCC. Le groupe a aussi contrôlé les études de la Doha link pour l'entreprise sud-coréenne GS E&C.

Maîtrise d'ouvrage :
l'Autorité publique pour les routes et le transport (Part). Afin de limiter les impacts sur le milieu marin, les travées avec précontrainte en pré-tension ont été préfabriquées dans une usine sur place.



© HYUNDAI-TYUN

La liaison comprend un pont à haubans de 340 m.

**PIEUX OUEST
CHEZ SPIE
BATIGNOLLES**

Spie Batignolles a acquis Pieux Ouest, entreprise de fondations spéciales dotée d'un bureau d'études, début avril.

L'entreprise sera intégrée à Spie Batignolles Fondations. Olivier Goudenège qui la cède, en devient directeur commercial France Ouest.

PROJET MINⁿD : LA 2^e SAISON EST LANCÉE

« Le projet de recherche Modélisation des informationsinteropérables pour les infrastructures durables (Minⁿd) se poursuit jusqu'en 2021-2022, » a informé Bernard Schaefer, nouveau président du projet, à Bim World (2-3 avril, Paris). Toute personne qui voudrait y participer est bienvenue, en particulier du côté des maîtres d'ouvrage.

Les partenaires de Minⁿd - 70 pour la phase 2014-2018 - n'ont pas sollicité l'aide financière - 200 000 euros en phase 1 - du ministère de l'Écologie. Le coût des quatre premières années est évalué à près de 4 millions d'euros en temps de travail avec comme autre revenu, les cotisations des membres. « Nous avons identifié les tendances à approfondir pour la suite, elles seront développées dans des groupes et sous-groupes de travail, » a indiqué Pierre Benning (Bouygues TP), co-directeur de Minⁿd avec Thierry Castaing (Egis).

Le groupe de travail Observatoire dresse un état des lieux du Bim, veille à ce que les données restent utilisables en phase exploitation et à leur transfert au grand public. Il fait le tri parmi les logiciels Open Bim (interopérabilité). Il définit les compétences d'un Bim manager en construction.

→ **Des guides paraissent**

Il travaille aussi à la structuration de la 5^e version de la norme de description (IFC) des objets qui composent un ouvrage de génie civil. Rappelons que la norme ISO 16739 de 2013 est conçue pour le bâtiment. D'où la nécessité de l'adapter pour des linéaires d'infrastructures. Des groupes IFC sont constitués afin de veiller à ce que la norme s'adapte aux différents cas d'usage du génie civil : IFC Bridge, IFC Road, IFC Rail, IFC tunnels, etc. ⁽¹⁾

Afin d'aider à l'implantation du Bim dans ces secteurs, des documents sont rédigés en parallèle de la normalisation, ce sont les livrables. Citons le guide "Comment rédiger une convention Bim ?" destiné à la maîtrise d'ouvrage, sorti en 2018. Il aura son pendant pour les Bim managers, sur la traduction en numérique des besoins exprimés par le commanditaire. En 2019, sera publiée la version validée de l'IFC Bridge.

→ **Introduire la notion d'incertitude**

Le deuxième groupe de travail se penche sur la qualification des données de façon à avoir une qualité homogène entre acteurs. « Nous aimerions pouvoir intro-



Couverture de la brochure IFC Bridge dont la version validée sort cette année.

duire des notions d'incertitude et de tolérance dans la maquette numérique, » précise Pierre Benning.

Le 3^e groupe s'intéresse à la création de données dont celles d'un jumeau numérique du projet pour l'exploiter.

Le groupe 4 se concentre sur la collecte des données. Par exemple, comment intégrer des fichiers d'objets dans un positionnement géographique, type SIG, sans avoir à tout ressaisir.

5^e groupe de travail (utilisation des données) : comment rapprocher le conçu et le construit.

6^e groupe (plates-formes collaboratives) : comment les acteurs d'un projet peuvent-ils travailler ensemble sur une plate-forme sans tout partager.

→ **Entrée du terrassement**

Un groupe se crée sur la géotechnique, le sous-sol ayant un impact dans les projets d'infrastructures. Le secteur du terrassement fait son entrée dans Minⁿd. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°947, décembre 2018, page 86 ; n°942, juin 2018, page 9 ; numéros spéciaux Bim : n°917, septembre 2015, et n°934, août 2017 ; n°814, avril-mai 2015, page 8.

LE CÔTÉ HUMAIN DU BIM

Le projet Minⁿd figurait en bonne place lors de la matinée que l'Association française de génie civil a consacré au Bim (20 et 21 mars, ESTP Cachan).

À noter aussi les interventions du bureau d'études belge, Greish, assez avancé dans la collaboration autour de la maquette numérique.

Des représentants de Systra, Setec, Ingerop, Hilti, Sixense sont intervenus. Le côté humain, indispensable à l'adoption du Bim, a été soulevé à plusieurs reprises.

www.afgc.asso.fr





terrasol

setec

L'ingénierie géotechnique à forte valeur ajoutée
www.terrasol.com

INGÉNIERIE **FORMATIONS** **LOGICIELS**

» Conception, Maîtrise d'oeuvre, Expertise Développement, Assistance technique «

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, en France comme à l'étranger.
Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Eole, Port de Brest, Barrages Aisne et Meuse, Liaison ferroviaire Lyon-Turin, Projet Cigéo, Kourou Ariane 6, Projet Lyon Part-Dieu...
Et à l'étranger : Réservoirs Al-Zour, Projet hydroélectrique Banda Azul, Aéroport des Maldives, Usine de valorisation des déchets de Sharjah, Ligne à Grand Vitesse HS2, Pénétrante de Tizi Ouzou, TER de Dakar...

 <p>Paris Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : terrasol@setec.com</p>	<p>Lyon Tél : +33 (0)4 27 85 49 35 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : terrasol@setec.com</p>	<p>Maroc Tél : +212 (061) 25 53 89 Fax : +212 (529) 03 64 00 Email : tarik.elmalki@setec.com</p>	<p>Tunisie Tél : +216 71 23 63 14 Fax : +216 71 75 32 88 Email : info@terrasol.com.tn</p>
--	---	--	--

ÉOLIENNES ANTI CYCLONIQUES À LA GUADELOUPE



Assemblage des pales sur une éolienne en 2018 à Sainte-Rose (Guadeloupe).

La puissance éolienne installée en Guadeloupe monte à 46 MW grâce à 8 machines inaugurées fin janvier. Elles peuvent produire 33 000 MWh, soit l'équivalent de la consommation de 17 000 personnes. Douze autres parcs sont déjà en service. L'île vise l'autonomie énergétique en 2030 et 50 % de son énergie par les

renouvelables d'ici l'année prochaine. Elle était à 20 % il y a six mois.
→ Stockage de l'électricité
 Les 8 éoliennes de 2 MW et de 78 m de haut, sont conçues pour résister aux ouragans. Quand le vent est trop fort, elles s'arrêtent. Les pales et la nacelle se placent face au vent pour éviter l'arrachement. Mais, pour cela, il faut de

l'électricité. En cas de coupure de courant, un générateur se met en route pour les maintenir en position.

L'installation est pilotée pour ne pas perturber le réseau électrique. L'exploitant, Valemo, déclare chaque jour pour le lendemain la prévision de production. Des batteries lithium-ion absorbent le surplus jusqu'à 5,3 MWh et le relâchent quand le vent mollit.

→ 50 millions d'euros

Maîtrise d'ouvrage : Sainte-Rose Energies ; développement et montage financier : Valorem ; maîtrise d'œuvre et contractant général : Valrea (filiale de Valorem) ; terrassement et génie civil : groupement Eiffage/DCT, Sotradom, Balineau, etc. ; exploitation : Valemo ; stockage d'électricité : Nidec ; éoliennes : G90, Siemens Gamesa.

Le parc de Sainte-Rose est aux mains de Valorem (65 %), de la Banque des territoires (30 %) et de la SEML Guadeloupe EnR (5 %). L'investissement de 50 millions d'euros est réparti entre elles sur le même schéma. ■

SOUFFLERIE RÉNOVÉE

Les locaux de la soufflerie des Arts et métiers vont être rénovés. L'équipement datant de 1952 sera doté de moyens de métrologie de pointe. Il servira à des essais aérodynamiques et acoustiques pour des éoliennes, des capteurs solaires, des immeubles de grande hauteur ainsi que dans l'automobile et l'aviation.

La soufflerie est rattachée au laboratoire Dynfluid du campus Arts et métiers de Paris, dirigé par Michaël Pereira, depuis janvier, qui travaille aussi sur l'hydrodynamique.

Le ventilateur mesure 3 m de diamètre. Le courant d'air dans la veine d'essai principale peut atteindre 40 mètres par seconde.



TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

Retrouvez l'actualité de la profession, les chantiers en images, les interviews des grands décideurs, le point de vue des ingénieurs.

Pour réserver votre emplacement publicitaire dans Travaux, contactez :

Prochains numéros :

- TRAVAUX n° 952 « Ville et patrimoine »
- TRAVAUX n° 953 « International »



Bertrand COSSON

Tél. 01 42 21 89 04

b.cosson@rive-media.fr

GEOAMERICAS AU BRÉSIL EN 2020

Geoamericas se tiendra du 26 au 29 avril 2020 à Rio de Janeiro (Brésil). Organisé tous les quatre ans par des organisations professionnelles nord-américaines comme la North American Geosynthetics Society, il comporte un salon et des conférences.

www.geoamericas2020.com



Geoamericas 2020 au Brésil à Rio de Janeiro.

DEUX TOURS EN UNE

La tour The One à Bruxelles (Belgique) rassemble en réalité deux tours. Un bâtiment de 73 m et 20 étages abrite 97 appartements. Il est accolé à un second, de 94 m offrant près de 30 000 m² pour des bureaux et des commerces au rez-de-chaussée.

Les deux constructions forment une tour grâce à un socle commun. Trois niveaux de parking ont été creusés, le plus haut étant réservé aux habitants.

L'immeuble de logements est reconnaissable par sa couleur blanche, tandis que les activités se cachent derrière une façade dont la couleur va du blanc au gris anthracite.

L'édifice est réalisé pour le promoteur Atenor dans le cadre du "Projet urbain loi" de la région de Bruxelles. L'idée est d'apporter plus d'humain dans un quartier de bureaux.

→ Eaux de pluie mises à contribution

L'ensemble construit par Eiffage Construction a été livré fin avril. À noter que les eaux de pluie récupérées contribuent au chauffage et au refroidissement. ■



La tour comprend un immeuble de logements de 73 m (au second plan) accolé à un immeuble de bureaux de 94 m.

LES GÉOSYNTHÉTIQUES SE POSENT DAVANTAGE À LA VERTICALE



Bassin d'irrigation au Sénégal (2009), photo primée par le Comité français de géosynthétiques.

« L'ambiance était à la fête, » témoigne Nathalie Touze-Foltz, présidente du Comité français des géosynthétiques (CFG) qui a fêté ses 40 ans lors des 12^e rencontres du 11 au 13 mars à Nancy (Meurthe-et-Moselle). Le monde n'a pas manqué. « Trois élus ont assisté à l'ouverture, de la mairie et de la région, c'est assez exceptionnel, ils ont montré qu'ils s'intéressaient aux géosynthétiques et qu'ils étaient impliqués, » ajoute M^{me} Touze-Foltz.

La demi-journée de formation qui précède les conférences a attiré 80 personnes et le salon, 30 exposants au lieu de 20 aux rencontres à Lille, en 2017⁽¹⁾. Le groupe de travail du CFG sur la formation a été relancé avec une nouvelle équipe. Des supports seront mis en ligne sur internet.

→ Dégrossir les sujets

Autre effort pour mieux faire comprendre l'emploi des géotextiles, géomembranes

et produits apparentés : chaque session des rencontres était, pour la 1^{re} fois, introduite par un membre du comité scientifique pour dégrossir les sujets et les relier aux questions actuelles.

L'industrie sucrière étant très présente dans l'Est et dans le Nord, une conférence "invitée" lui a été dédiée. Rappelons qu'elle est productrice de grandes quantités d'eau car la betterave d'où est tiré le sucre, en contient 77 %. Ces eaux doivent être stockées et traitées dans des bassins préférentiellement étanches. Arcadis a présenté la réhabilitation de bassins d'eau terreuse et d'eau condensée (extraction du sucre), et le changement d'usage de deux anciens bassins après pose de géomembranes.

→ Extension d'ISDND en rehausse

Les installations de stockage de déchets sont aussi à l'ordre du jour, suite à l'arrêt de 2016 qu'il faut expliquer aux professionnels.

L'arrêté ministériel (MTES) du 15 février 2016 introduit la possibilité d'extension verticale des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND).

Le BRGM a parlé des extensions en rehausse, sujet d'un guide à paraître. Un autre guide est en préparation, cette fois par le CFG, sur l'anti remontée de fissures par inclusions géosynthétiques, en renforcement de chaussée, thème de la 3^e conférence invitée.

→ Géocomposites dans une ancienne carrière

Pour la 1^{re} fois également, un chantier a été mis à l'honneur, une façon de saluer la collaboration entre maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre et entreprises.

Le Syndicat martiniquais pour le traitement et la valorisation des déchets a ouvert, en 2017, une ISDND dans une ancienne carrière, au Petit Galion près de Trinité. Un dispositif d'étanchéité et de drainage en géocomposites a été posé en paroi verticale.

Les conférences étaient planifiées autour de quatre thèmes : contribution des géosynthétiques à la mobilité par leur présence dans les infrastructures, à la préservation des milieux (eau, air, sol), à la protection contre les risques naturels et ceux liés à l'activité humaine, et durabilité, emprunts environnementales et qualité des matériaux.

Conférences publiées sur www.cfg.asso.fr/publications/les-rencontres-geosynthetiques/actes-colloques-rencontres-2019. ■

⁽¹⁾ Cf. Travaux n°933, juin 2017, page 7 et n°943, juillet-août 2018, page 11.

CORDON ANTI ÉROSION MARINE

Le dispositif contre l'érosion à Gouville-sur-Mer (Manche) est suivi pendant trois ans. Depuis novembre 2017, un géotextile de 500 m de long, rempli de sable, affaiblit les vagues qui venaient grignoter la dune lors des tempêtes. Habitations, camping et activité conchylicole étaient menacés par la disparition de cette barrière naturelle. Le géotube (Tencate) mesure 3,25 m de diamètre et 2 m de haut. Il est rempli de sable prélevé sur une plage voisine et déposé sur un tapis anti affouillement. Le sable apporté par la mer s'accumule à l'arrière, le long du trait de côte. Aujourd'hui, près de 50 m du cordon ont presque disparu sous le sable.

La dune se reconstruit, la plage est plus haute.

→ 700 000 euros

Le dispositif comprend une partie perpendiculaire pour lutter contre les vagues qui arrivent de deux directions différentes.

Coût : 700 000 euros à 60 % à la charge de la commune et 40 % payés par l'État (Direction départementale des territoires et de la mer).



Production d'une géomembrane structurée en PEHD (Autriche), 2^{de} photo primée.



Le sable s'accumule derrière le géotube.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 24 AU 26 JUILLET

ICSA, 4^e conférence structures et architecture

Lieu : Lisbonne (Portugal)
www.icsa2019.arquitectura.uminho.pt

• 1^{er} AU 6 SEPTEMBRE

17^e conférence ECSMGE (mécanique des sols)

Lieu : Reykjavik (Islande)
www.ecsmge-2019.com

• 4 ET 5 SEPTEMBRE

Smart buildings for smart cities

Lieu : Bruxelles (Belgique)
www.univ-sb4sc.org

• 4 AU 6 SEPTEMBRE

La métropole en évolution

Lieu : New-York (États-Unis)
www.iabse.org

• 9 SEPTEMBRE

Conférence amiante

Lieu : Marseille
www.salonamiante.fr

• 17 ET 18 SEPTEMBRE

Impact de la mobilité intelligente sur l'environnement

Lieu : Bordeaux
www.its4climate.eu

• 23 ET 24 SEPTEMBRE

1^{re} conférence méditerranéenne des jeunes ingénieurs

Lieu : Mugla (Turquie)
http://Mygec2019.org

• 24 ET 25 SEPTEMBRE

9^e assises Port du futur

Lieu : Lille
www.portdufutur.fr

• 30 SEPTEMBRE AU 3 OCTOBRE

Smart Rivers (AIPCN)

Lieu : Lyon
www.cerema.fr

• 30 SEPTEMBRE AU 4 OCTOBRE

Congrès mondial immeubles en bois de moyenne et grande hauteur

Lieu : Québec (Canada)
http://woodrise2019.ca

• 1^{er} AU 3 OCTOBRE

Rencontres nationales du transport public

Lieu : Nantes
www.rencontres-transport-public.fr

• 1^{er} AU 4 OCTOBRE

68^e congrès de l'industrie minérale

Lieu : Montpellier
www.lasim.org

• 2 AU 4 OCTOBRE

9^e conférence internationale sur les ponts en arc

Lieu : Lisbonne (Portugal)
https://web.fe.up.pt/~arch19/

• 6 AU 9 OCTOBRE

Congrès mondial de la route

Lieu : Abu Dhabi
www.cerema.fr

• 15 ET 16 OCTOBRE

Colloque Le Pont : retour d'expérience sur défaillances d'ouvrages

Lieu : Toulouse
www.afgc.asso.fr

• 23 AU 26 OCTOBRE

Conférences internationales sur les énergies renouvelables

Lieu : Séoul (Corée du sud)
www.ren21.net/irecs/

• 4 AU 7 NOVEMBRE

Congrès mondial du solaire

Lieu : Santiago (Chili)
http://swc2019.org

• 4 AU 8 NOVEMBRE

Bâtimat

Lieu : Paris-Nord-Villepinte
www.batimat.com

• 10 AU 14 NOVEMBRE

Infrastructures de transport durables

Lieu : Le Caire (Égypte)
www.geomeast.org

• 19 AU 21 NOVEMBRE

Salon des maires

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

• 26 ET 27 NOVEMBRE

4^e rencontres recherche sites et sols pollués

Lieu : Montrouge (Hauts-de-Seine)
www.ademe.fr

FORMATIONS

• 3 ET 4 JUILLET

Projets d'infrastructures : concertation et participation du public

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

• 12 ET 13 SEPTEMBRE

Dimensions juridiques du Bim

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

• 16 ET 17 SEPTEMBRE

Gérer les déchets de chantier

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

• 18 ET 19 SEPTEMBRE

Bétons : nouveau contexte normatif durabilité

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

• 24 ET 25 SEPTEMBRE

Béton précontraint

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

• 25 AU 27 SEPTEMBRE

Calcul et conception des assemblages acier ou mixtes (NF EN 1993-1-8)

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

• 14 ET 15 OCTOBRE

La robustesse des structures

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

• 20 AU 22 NOVEMBRE

Résistance des matériaux : fondements des calculs et du dimensionnement

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

• 26 AU 28 NOVEMBRE

Échangeurs thermiques : de la technologie au dimensionnement

Lieu : Aix-les-Bains (Savoie)
https://greth.fr/

NOMINATIONS

BOUYGUES CONSTRUCTION :

Aurélie Simonin remplace Damien Rebourg à la direction de la communication.

CEREMA :

Céline Bonhomme est la nouvelle directrice scientifique et technique et chargée des relations internationales du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, en remplacement de David Chupin qui a assuré l'intérim après le départ de Jean-Philippe Lagrange pour l'Institut Mines Télécom, comme directeur de recherche.

CINOV :

Frédéric Lapage a été élu président de Cinov, fédération de syndicats et chambres régionales des métiers de la prestation intellectuelle, du conseil, de l'ingénierie et du numérique, à la suite de Dominique Sutra Del Galy.

MIN^oD :

Bernard Schaefer remplace Louis Demilcamps à la présidence du projet de recherche Modélisation des informations interopérables pour les infrastructures durables. Le projet est toujours dirigé par Pierre Benning et Christophe Castaing.

UNICEM :

Xavier Chastel prend la suite d'Igor Bilimoff en tant que délégué général de l'Union des industries des carrières et matériaux de construction. Rémy Moroni devient président pour le Grand-Est. Il succède à Philippe Toffolin.



**Comment
protéger
une trémie
d'escalier ?**

PréventionBTP

 **En direct**

Une réponse immédiate à vos questions sécurité
et prévention grâce à nos experts OPPBTP



preventionbtpdirect.fr



PASSEZ SIMPLEMENT À LA PRÉVENTION

OPPBTP
La prévention BTP

RTE

OPTIMISER LE PRÉSENT ET ANTICIPER L'AVENIR

RTE : pour explicite que soit le nom qui se cache derrière cet acronyme - Réseau de Transport d'Électricité - il apparaît malgré tout comme très restrictif de la multitude d'activités que revêt le transport d'électricité : de la gestion et de la surveillance du réseau à son entretien en passant par l'amélioration des infrastructures aériennes et souterraines ainsi que des transformateurs, des pylônes, la démarche de RTE va bien au-delà du simple acheminement de l'électricité depuis ses sources de production - multiples - jusqu'à l'utilisateur final. À quoi s'ajoute l'optimisation de l'existant et l'anticipation sur l'avenir par le développement de nouvelles technologies de transport et l'implication effective et pragmatique dans la mise en place et l'exploitation des nouveaux réseaux éoliens marins ancrés et flottants. **Ce que nous explique Michel Béna, directeur-adjoint de la direction Recherche et Développement de RTE.**

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

En quelques mots et quelques chiffres-clés, que représente RTE ?

RTE, Réseau de Transport d'Électricité est le propriétaire et l'exploitant du réseau de transport en métropole, c'est-à-dire de l'ensemble des lignes haute tension et très haute tension, de 63 000 volts à 400 000 volts, les lignes de tensions inférieures étant gérées par les distributeurs jusqu'à la prise de courant de 220 volts du particulier.

Cela représente très précisément 105 857 km de lignes dont près de la moitié sont des lignes à très haute tension (400 000 et 225 000 volts) qui maillent, telle une toile d'araignée, le

territoire français et, au-delà, assurent les interconnexions transfrontalières avec certains pays voisins : Allemagne, Belgique, Italie, Suisse, Espagne, ainsi que la Grande-Bretagne par un câble sous-marin.

Aujourd'hui, l'électricité ne se pense plus à la maille nationale mais bien à la maille européenne, avec de plus en plus de dynamisme dans les échanges, de la Pologne au Portugal en passant par les pays scandinaves. Nous sommes dans une logique de marché européen de l'électricité, voulue d'ailleurs par la Commission Européenne.

Nous avons deux grandes missions : la première est de faire parvenir l'éner-



2



3

FIGURE 1 © RTE - FIGURES 2 & 3 © SEIGNETTE LAFONTAN / RTE

gie des centres de production vers les centres de consommation. La seconde, moins connue du grand public, est d'assurer l'équilibre offre/demande. La fréquence de 50 Hz, qui est disponible à tout moment sur l'ensemble du réseau français, est garantie par le respect mécanique de cet équilibre entre la production et la consommation. RTE est responsable, en temps réel, de cet équilibre.

Cette mission nous est dévolue parce que, du fait de notre fonction, nous captions des données sur l'ensemble du territoire. Ces données sont actuellement de l'ordre de 300 000 toutes les secondes. Nous estimons que dans l'avenir, elles pourront atteindre jusqu'à 3 millions du fait de la multiplicité des nouveaux acteurs et des nouveaux

1- Michel Béna, directeur adjoint de la direction Recherche et Développement de RTE.

2- Une ligne aérienne en altitude dans la région d'Albertville.

3- Le Centre National d'Exploitation du Système en charge de la surveillance du réseau de 400 000 volts (CNES) à Saint-Denis.

4- Le centre CORESO, à Bruxelles, supervise notamment la zone Benelux et la France.

5- L'énergie hydraulique (barrages, lacs et fleuves) représente 19,2% de la puissance installée en France.

MICHEL BÉNA : PARCOURS

Diplômé de Supelec en 1990 (École Supérieure d'Électricité), option "intelligence artificielle", Michel Béna a passé l'ensemble de sa carrière d'abord au sein d'EDF, puis de RTE, depuis sa création en juillet 2000.

Il travaille essentiellement sur la thématique réseaux : logiciels de développement, stabilité, prévisions de consommation, optimisation...

Chez RTE, il occupe d'abord le poste de Manager Power Systems R&D de janvier 2000 à décembre 2011, avant de lancer l'activité "SmartGrids" dont il est directeur entre 2012 et 2017, c'est-à-dire responsable des SmartGrids, ou Réseaux Électriques Intelligents (REI) et coordonnateur de l'implication de RTE dans le plan gouvernemental REI dont la rédaction de la feuille de route avait été confiée à RTE en octobre 2013.

Il est suppléant RTE au Conseil d'Administration de l'association Think-SmartGrids.

Michel Béna est directeur adjoint de la direction R&D de RTE depuis juillet 2017.

points de mesure sur nos infrastructures.

À partir du moment où RTE dispose de toutes les données disponibles sur le territoire français, il est capable d'agir sur l'ensemble des acteurs pour maintenir cet équilibre.

Nous avons également une mission en termes de prospective, qui nous est confiée par l'État depuis la création de RTE : celle d'éclairer l'avenir à l'échéance de 5 à 10 ans, c'est-à-dire de simuler l'évolution du système électrique.

RTE EN CHIFFRES

8500 personnes dont 120 à la division Recherche & Développement qui dispose d'un budget contractuel de 35 millions d'euros.

105 857 km de lignes dont près de 50% de lignes à très haute tension (400 000 et 225 000 volts) et près de 50% de lignes à 150 000, 90 000 et 63 000 volts.

8 dispatchings à Lille, Lyon, Marseille, Nancy, Nantes, Saint-Denis, Saint-Quentin-en-Yvelines, Toulouse.

1 241 transformateurs.

2 744 postes électriques.

3 515 points de livraison.

RTE évalue l'impact des scénarios d'évolution du mix énergétique sur la sécurité d'approvisionnement en électricité. Les résultats de ces simulations sont récapitulés dans le Bilan Prévisionnel que RTE publie chaque année.

Ces missions sont de plus en plus en interaction au niveau européen.

L'électricité n'ayant pas de frontière, le réseau de transport est européen mais appartient à chacun des transporteurs dans leur pays avec des modèles institutionnels variables.

Pour coordonner l'ensemble du système, ces transporteurs sont regroupés au sein d'une association dénommée ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) qui réunit 43 gestionnaires de réseaux de transport en Europe, ce qui donne une idée de l'amplitude du système électrique au niveau européen.

C'est une instance de coordination en fort lien avec les institutions européennes.

L'Europe vise également à avoir le meilleur plan de développement du réseau au niveau européen. Elle s'appuie à cet effet sur le "Ten Years Network Development Plan" (TYNDP), établi par ENTSO-E, qui indique les lignes à enjeu qu'il sera nécessaire de construire à l'horizon de dix ans sur le territoire européen.

La mise en place d'un marché européen de l'énergie se poursuit. Il y a besoin d'interactions entre les gestionnaires de réseaux pour anticiper les changements de flux en fonction de l'offre et de la demande.

Par ailleurs, les énergies renouvelables ne connaissant pas les frontières, en fonction des données climatiques, la production des parcs éoliens ou des parcs photovoltaïques est transférée en partie d'un pays à un autre. ▶

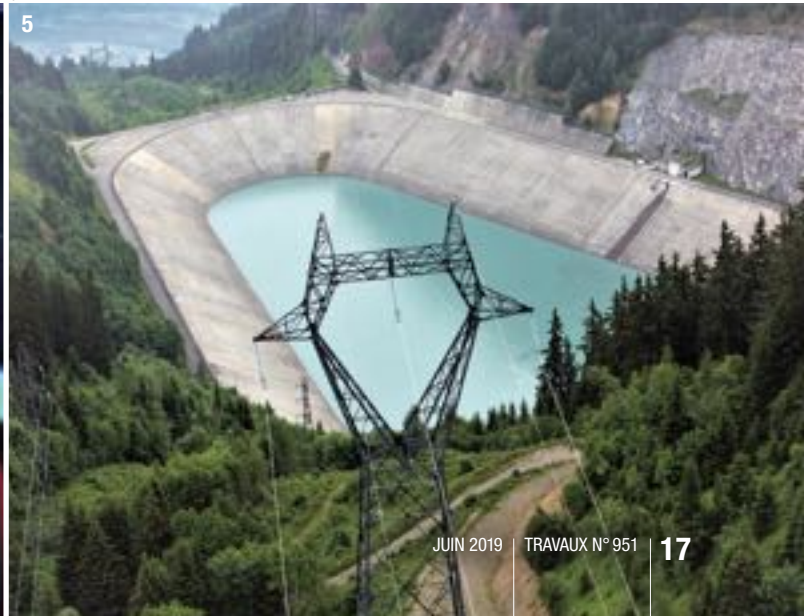
© JULIEN DE WILDE / RTE

4



© RTE

5





6 © RTE

C'est par exemple le cas avec l'Allemagne dont nous sommes appelés à anticiper la météorologie afin de réguler les flux transfrontaliers. Ceci nécessite aujourd'hui l'existence de centres transnationaux. RTE est partie prenante du centre nommé CORESO, installé à Bruxelles, qui supervise notamment la zone Benelux et France. Il permet de collecter des informations en amont sur l'ensemble des pays concernés et a un rôle de conseil par rapport aux centres de décision nationaux.

Nous sommes ainsi au carrefour, d'une part, de l'aménagement du territoire avec une logique régionale et, d'autre part, de celui de l'aménagement énergétique au niveau européen. Nous faisons la jonction entre les objectifs régionaux, les régions ayant aujourd'hui en France de plus en plus de prérogatives avec les nouveaux modes de production décentralisés et les grands objectifs européens.

Quelle est l'organisation de RTE en France ?

Sur l'ensemble des 8500 salariés qui constituent son effectif, 2000 sont affectés à des fonctions centrales tandis que les autres sont répartis sur l'ensemble du territoire dans des centres régionaux : 7 centres de conduite régionaux appelés dispatchings, qui sont les salles de supervision, et une trentaine de centres de maintenance. Un dispatching national supervise l'ensemble du système électrique pour la France et fait le lien avec les autres transporteurs européens, c'est-à-dire tous les pays limitrophes y compris les pays insulaires. RTE a des liens électriques et institutionnels avec tous ces pays.

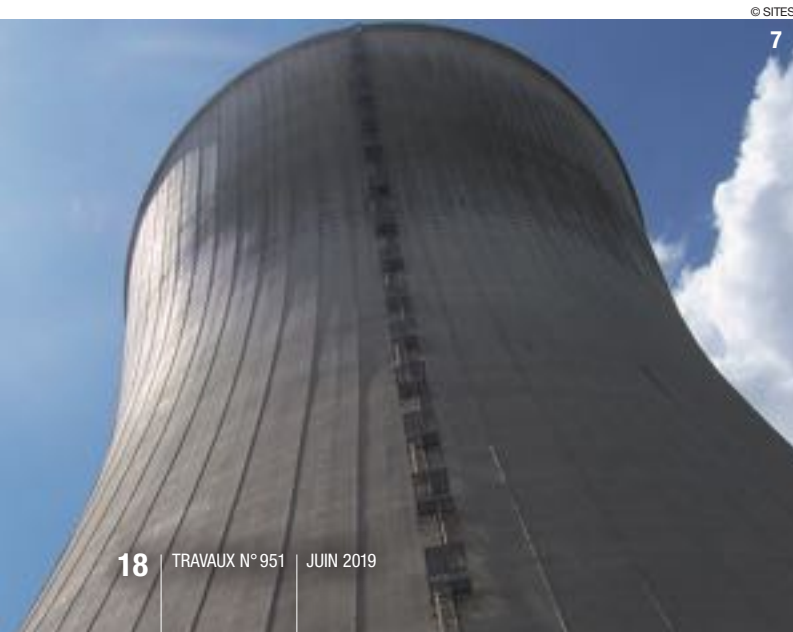
Quels sont les projets de RTE en matière d'interconnexions européennes ?

Nous avons plusieurs objectifs en vue de renforcer les interconnexions euro-

péennes. L'objectif est d'avoir la solution la plus pertinente tant d'un point de vue environnemental qu'économique.

Il faut savoir que nous avons deux technologies sur un réseau de transport : le courant alternatif utilisé pour les lignes aériennes et les câbles de faible longueur ou puissance et le courant continu, pour certains cas spécifiques, notamment les très longs câbles souterrains et sous-marins. C'est déjà le cas, par exemple, de la liaison sous la Manche entre la France et l'Angleterre ainsi qu'entre la France et l'Espagne avec la création de stations de conversion qui transforment le courant continu en courant alternatif et inversement. Nous avons d'autres projets en cours ou à venir avec l'Irlande, avec l'Espagne par le Golfe de Gascogne, avec l'Angleterre, avec IFA2 qui assurera le doublement de l'interconnexion existant depuis déjà une dizaine d'années. Pour répondre à l'accroissement des échanges entre

la France et l'Angleterre, RTE et son homologue britannique National Grid créeront, à horizon 2020, une nouvelle liaison transfrontalière entre les deux pays : IFA2. Ce projet sous-marin de 250 km de longueur en courant continu d'une capacité de transport de 1 GW, cofinancé par l'Union Européenne, permettra de mettre à profit la complémentarité des parcs de production existants et futurs de part et d'autre de la Manche et de la mer du Nord. Le développement massif des énergies renouvelables dans les prochaines années (plusieurs milliers de mégawatts dans chacun des deux pays) induira des flux dans les deux sens, très variables selon les conditions climatiques de chacun des pays. IFA2 est inscrit au schéma décennal de développement du réseau de transport d'électricité en France, en Angleterre et au niveau européen. Les travaux d'IFA2 ont démarré au début de l'année 2018.



© SITES

7



© GRIMBALL PROD / RTE

8

Quelle est la position de RTE vis-à-vis des énergies renouvelables ?

Notre premier rôle est d'accompagner le développement des énergies renouvelables.

RTE participe dès le début à la définition des zones dans lesquelles les porteurs de projet pourront mettre en œuvre leurs projets, nous proposons des schémas régionaux de raccordement pour les accueillir.

Dans les zones clairement identifiées, les producteurs ont de ce fait la garantie de pouvoir évacuer leur production à une échéance définie préalablement à l'issue des concertations entre l'ensemble des intervenants.

Ce rôle en amont permet de planifier les zones où vont se développer les énergies renouvelables et permettre de construire le cas échéant de nouvelles lignes à bon escient. Pour les réseaux à terre, la majorité des raccordements est étudiée en concertation avec les distributeurs. Pour l'offshore, nous travaillons en direct avec les porteurs de projets sachant que, maintenant, la loi nous demande d'assurer le financement et la construction des lignes et des plateformes en mer. Nous étudions ainsi l'ensemble des installations avec ses impacts sur l'atterrissage, sur la biodiversité marine, sur l'environnement.

Le deuxième niveau d'intervention se situe au niveau de la distribution des

énergies ainsi produites : il nous faut anticiper au maximum la production de ces énergies pour dans une heure, pour dans trois heures, pour demain.

À cette intention, nous avons développé dans les huit tours de contrôle (appelées dispatchings) dont dispose RTE en France - une à Saint-Denis (93) et sept en régions - des modèles de prévision de production éolienne et photovoltaïque, partout en France et en lien avec Météo France. Si l'on examine aujourd'hui la prévision "France", le taux d'erreur à 24 heures se situe au maximum à 7%.

Cette précision nous permet de déterminer comment vont participer demain les énergies renouvelables à l'équilibre

production/consommation français. Pour les gros centres de production : centrales nucléaires, centrales à charbon, centrales hydro-électriques... nous connaissons la production en temps réel à l'aide de capteurs de mesure. Il en sera de même sur les centres de production éoliens et photovoltaïques sur lesquels nous aurons des informations en temps réel.

Ces données sont remontées dans les dispatchings, sont analysées et utilisées pour faire des simulations afin de vérifier que l'ensemble du système est exploité en toute sécurité, et que, même en cas d'incident sur l'une de nos lignes ou l'un de nos postes, la sécurité d'approvisionnement est maintenue sur tout le territoire métropolitain.

6- La future plateforme de raccordement en mer de Dunkerque.

7- Le nucléaire représente 47,5% de la puissance installée en France.

8- La part de la production d'énergie photovoltaïque en France s'élève actuellement à 11 %.

9- Un champ d'éoliennes offshore déjà en service.

10- Poste "PEXI" d'Eguzon à proximité du barrage hydroélectrique d'Eguzon-Chantôme dans le département de l'Indre.

LE RACCORDEMENT DU PARC ÉOLIEN EN MER DE SAINT-NAZAIRE

L'État a lancé un appel d'offres en 2011 portant sur des installations éoliennes de production d'électricité en mer, dans l'objectif de développer les énergies renouvelables en France. Un consortium mené par EDF Énergies Nouvelles a été désigné pour la création d'un parc éolien offshore au large de Saint-Nazaire, d'une puissance de 480 mégawatts avec l'installation de 80 éoliennes de 6 MW

En tant que responsable du réseau public de transport d'électricité en France, RTE est chargé de raccorder cette installation en mer au réseau électrique à 225000 Volts existant. Plusieurs années d'études préliminaires et de concertation avec les acteurs du territoire ont permis de déterminer un tracé de moindre impact, avec :

- **Un cheminement sous-marin depuis un poste électrique en mer (propriété du producteur) jusqu'à la côte.**
- **Le raccordement des câbles sous-marins aux câbles souterrains (appelé "jonction d'atterrissage") au niveau de la plage de la Courance, à Saint-Nazaire.**
- **Un cheminement souterrain traversant les communes de Saint-Nazaire, Trignac, Montoir-de-Bretagne, Donges et Prinquiau.**
- **La création d'un poste électrique à Prinquiau et son raccordement au réseau à 225000 Volts existant.**

Des expérimentations ou des recherches sont-elles menées au niveau de l'exploitation des lignes existantes ?

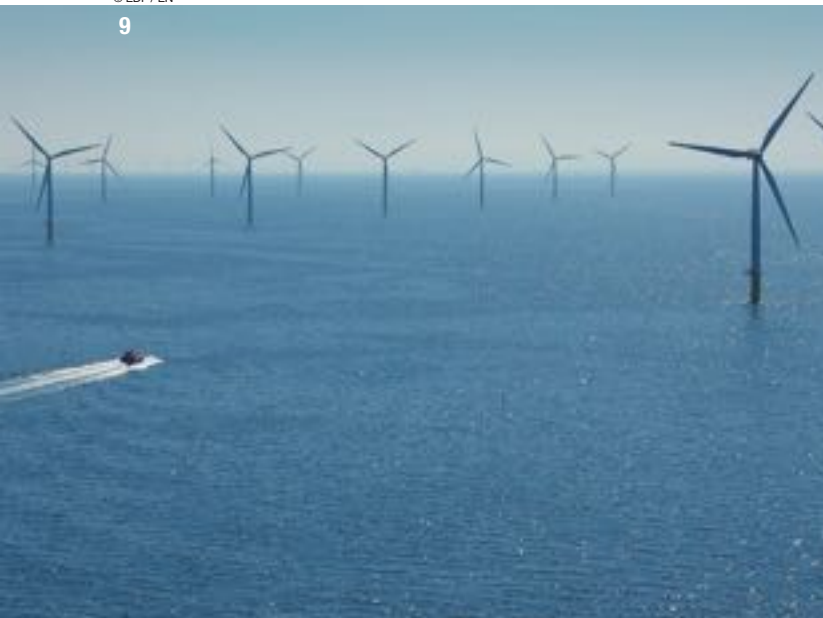
Outre le raccordement physique des unités de production, qu'elles soient éoliennes ou terrestres, et qui nécessitent toujours des câbles, la R&D chez RTE s'intéresse à ce que nous appelons la digitalisation ou l'hybridation du réseau.

Je ferai ici une analogie avec l'évolution observée dans l'industrie automobile. Les automobiles sont équipées de plus en plus de capteurs qui alimentent des logiciels afin non seulement d'optimiser l'utilisation du moteur mais aussi de surveiller l'état de santé général du véhicule.

Nous sommes complètement engagés dans la même logique aujourd'hui via le déploiement de capteurs à des endroits où il n'y en avait pas avant, à des logiciels de simulation, afin d'une part de maximiser l'utilisation des infrastructures existantes, d'autre part, ▷

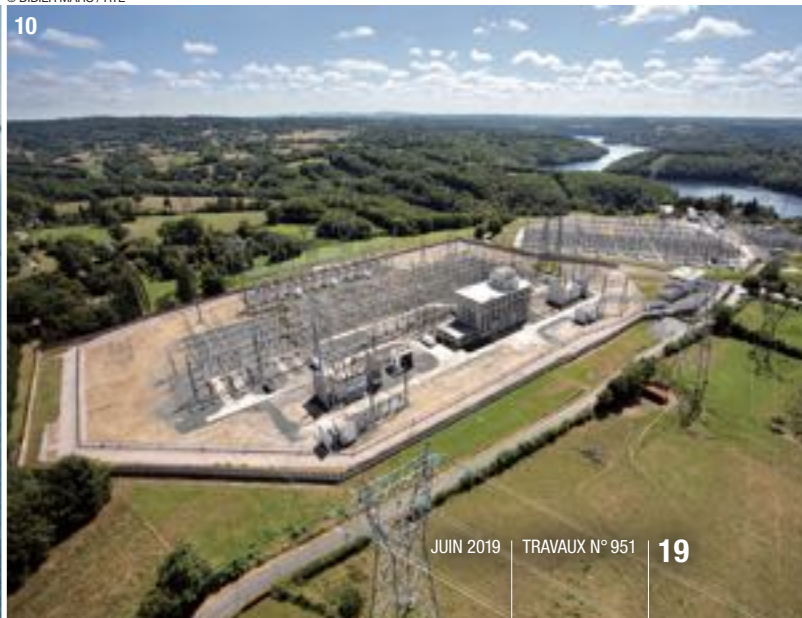
© EDF / EN

9



© DIDIER MARC / RTE

10





11

© MARC MONTAGNON



12

© MARC MONTAGNON



13

© MARC MONTAGNON



14

© MARC MONTAGNON



15

© MARC MONTAGNON

d'optimiser la vie de ces actifs : observer en temps réel chaque équipement, son évolution dans le temps, anticiper son entretien voire son renouvellement. Un exemple : ce qui est dimensionnant par rapport à l'utilisation de nos câbles, c'est leur température ; une température trop élevée, liée à un courant important, peut mener à un endommagement du câble. Aussi, nous cherchons à maîtriser les facteurs qui influent sur cette température et ce qui nous aidera à l'observer avec plus de précision. Des expérimentations sont menées actuellement à l'aide de fibres optiques insérées dans les installations souterraines permettant de déterminer tous les mètres la température des câbles en temps réel.

Une autre expérimentation, déjà en phase de déploiement, est menée pour les lignes aériennes qui, à la différence des câbles enfouis, peuvent être refroidies par le vent, qui est le premier facteur de refroidissement de nos lignes, ce que nous savions mais qu'il convenait de modéliser de manière plus fine. Nous sommes actuellement dans une

phase de modélisation de calculs pour mesurer l'impact du vent sur une ligne aérienne en fonction de sa puissance et de sa direction, longitudinale ou perpendiculaire. Cette démonstration est visible dans un poste "intelligent" à l'ouest d'Amiens : elle a montré que

le vent pouvait refroidir d'une manière considérable les lignes, ce qui nous permet d'optimiser leur utilisation, en termes de courant transporté, tout en restant dans les limites admissibles. Nous ajustons la puissance qui passe dans le câble en fonction du vent.

11 à 15- Plusieurs générations de pylônes sont en place sur le réseau RTE : quelques exemples, dans les Yvelines.

16- La station de conversion IFA 2000 de l'interconnexion électrique France-Angleterre.

17- Un poste de conversion dans la région d'Albertville.

18- Le pylône "équilibre" porté par le groupement Hugh Dutton Associés et Gritech, équipera la future ligne Avelin-Gravelle, entre Arras et Lille.

19- Le poste source haute tension (225 000 volts) de Nourottes à Triel-sur-Seine, dans les Yvelines.

PUISSANCE ÉLECTRIQUE INSTALLÉE ET BILAN ÉLECTRIQUE EN FRANCE EN 2018

Si l'on examine la puissance installée en 2018, la répartition est la suivante :

- Nucléaire : 47,5%
- Thermique : 14%
- Hydraulique : 19,2%
- Éolien : 11,5%
- Solaire : 6,4%
- Bioénergies : 1,5%

Pour la même année, le bilan électrique, c'est-à-dire la nature de l'énergie effectivement produite, s'établit ainsi : le nucléaire représente 71,7%, l'hydraulique, à la fois de barrages, de lacs et de fleuves, s'élève à 12,4%, le reste se partageant entre les énergies renouvelables et les énergies fossiles (fuel, charbon et gaz), le thermique 7,2%, l'éolien 5,1%, le solaire 1,9% et les bioénergies 1,8%.



16

© RTE / FRANÇOIS CHEVREAU



17

© SEIGNETTE LAFONTAN / RTE

LE PROJET IFA 2 EN BREF

Le projet IFA2 consiste à relier deux systèmes en courant alternatif au moyen d'une liaison sous-marine et souterraine en courant continu d'environ 250 km. Par conséquent, l'interconnexion requiert la construction d'une station de conversion à chacune de ses extrémités, c'est-à-dire à Daedelus (près de Southampton, en Angleterre) et à Tourbe (au Sud-est de Caen, en France).

Compte tenu de la capacité de transport de puissance électrique de la liaison à construire (1 GW), de sa longueur (environ 200 km en mer et 30 km sur terre côté français), seule la technologie du "courant continu", qui présente des avantages, notamment celui d'une perte d'énergie plus faible, est envisageable. Ce choix nécessite l'installation, à chaque extrémité (côté français et côté anglais) d'une station de conversion alternatif/continu, pour relier la liaison au réseau général, qui fonctionne en courant alternatif. Cette technique est également utilisée sur les futures liaisons d'interconnexion vers l'Espagne ou l'Italie.

La liaison sous-marine est composée de deux câbles d'environ 15 cm de diamètre. Chaque câble est constitué d'un "conducteur", enveloppé dans plusieurs couches isolantes et protectrices puis déroulé au fond de la mer. Les câbles sont ensuite ensouillés ou recouverts au fond de la mer pour éviter toute gêne vis-à-vis des activités de pêche ou toute détérioration. L'ensouillage consiste à creuser un sillon dans le sol marin pour y poser le câble. La profondeur d'ensouillage dépend de la nature des sols et des activités présentes dans la zone. À l'arrivée sur terre, le franchissement dunaire est prévu par forage dirigé.

Le projet vise à accompagner la transition énergétique. Le vent ne souffle pas au même moment en France et en Angleterre et le soleil ne brille pas en même temps. Renforcer les liens électriques entre les deux pays permettra donc de mieux utiliser les énergies renouvelables produites de part et d'autre de la Manche. Ainsi, le projet IFA2 présente un enjeu national et européen majeur. À ce titre, il a été désigné le 14 octobre 2013 par la Commission et le Parlement européens comme "projet d'intérêt commun" au titre du règlement européen des infrastructures énergétiques.

Ce démonstrateur étant situé en Picardie, où les parcs éoliens sont nombreux, il s'établit comme un cercle vertueux entre le vent qui fait tourner les éoliennes et qui, en même temps, refroidit les lignes aériennes. Le but, in fine, est de faire passer plus de courant dans nos câbles lorsque le vent est fort - jusqu'à 30% de puissance supplémentaire - et éviter ainsi de construire une nouvelle ligne. Ce projet, expérimenté avec succès depuis 2013, va être généralisé à l'ensemble des postes pouvant être concernés par l'opération, en raison de leur situation topographique, soit un tiers environ des quelques 2800 postes en métropole. Ce déploiement de capteurs et de logiciels de traitement a pour but de maximiser l'utilisation des équipements de façon à éviter, autant que possible, de construire de nouvelles lignes. Ce que nous appelons "l'hybridation" doit nous permettre d'optimiser les infrastructures existantes grâce au numérique.

Nous voulons être également plus pertinents au niveau de la gestion de nos actifs en multipliant les points de mesure sur les lignes, sur les pylônes, sur les transformateurs, sur tous les objets dans les postes sur le territoire pour déterminer la politique de gestion et maintenance la plus adaptée, équitablement par équipement.

Parallèlement, dans le domaine du pilotage en temps réel du système électrique, nous installons dans nos dispatchings, afin de simplifier le travail des opérateurs qui reçoivent une multitude d'informations, des logiciels d'aide à la décision à base d'intelligence artificielle leur permettant de gérer au mieux ces informations. Ils peuvent de ce fait passer d'une logique de supervision à une logique d'hypervision, se projeter en temps réel

de la manière la plus pertinente possible dans le futur proche et prendre ainsi les meilleures décisions.

L'électricité est une énergie qui se stocke difficilement, si ce n'est au travers de batteries. RTE a-t-elle à l'étude une solution pour résoudre ce problème qui se pose notamment avec la production des parcs éoliens ?

Lorsque des parcs à énergie renouvelable viennent s'installer, il faut évacuer

cette production, soit en construisant une nouvelle ligne quand c'est indispensable, soit avec une solution de stockage que nous testons actuellement. Le vent ne soufflant pas en permanence très fort toute l'année dans les parcs éoliens, nous avons constaté, à certains endroits, qu'il n'y a que quelques heures dans l'année où les lignes existantes ne sont pas en mesure d'évacuer l'intégralité de la production. Nous testons une solution afin de stocker ce surplus de production qui

sature nos lignes sans en construire de nouvelles. Ce projet baptisé "Ringo", concept breveté, vise à installer des batteries de quelques dizaines de MW dans trois postes concernés par cette situation. Ces batteries, en liaison les unes avec les autres, pourraient ainsi constituer une ligne virtuelle, les unes se chargeant pendant que les autres se déchargent. Le test sera mené à partir de 2020 en liaison avec les acteurs du système électrique.

Une démarche est-elle entreprise pour améliorer l'aspect visuel des installations et notamment celui des pylônes ?

Des travaux sont entrepris, à travers une Chaire, avec des étudiants de l'École Nationale Supérieure du Paysage de Versailles pour étudier la perception du paysage par les populations et mieux appréhender l'accueil de nos ouvrages. Il en est de même avec nos postes électriques qui font eux aussi l'objet d'aménagement paysager de qualité. Suite à l'engagement pris lors du débat public, RTE avait lancé, dès février 2012, une étude sur de nouvelles formes de ligne et de pylônes afin d'améliorer l'intégration paysagère sur le territoire entre Arras et Lille et l'esthétique de la future ligne aérienne Avelin - Gavrelle.

Un concept unique, au design épuré, a été choisi pour équiper cette future ligne : baptisé "équilibre" il est porté par le groupement Hugh Dutton Associés et Gritech et équipera la ligne électrique lors de sa reconstruction. Ce choix répond aux critères du cahier des charges axé sur l'innovation esthétique, l'intégration aux territoires traversés, une faisabilité technique réaliste y compris en termes de maintenance et des coûts maîtrisés. □

© HUGH DUTTON ASSOCIÉS

18



© MARC MONTAGNON

19





1 © RAMPA

RAMPA ENTREPRISES

UNE SAGA FAMILIALE

AUTOUR DE L'EAU, DE L'ÉNERGIE ET DU BÉTON

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

DEPUIS QUELQUES ANNÉES, LA QUATRIÈME GÉNÉRATION RAMPA ARRIVE AUX COMMANDES DE L'ENTREPRISE FONDÉE PAR LEUR ARRIÈRE-GRAND-PÈRE JEAN RAMPA EN 1925. AUJOURD'HUI, FORTES D'UNE LONGUE EXPÉRIENCE, RAMPA ENTREPRISES AVEC SES FILIALES RAMPA TRAVAUX PUBLICS, RAMPA ÉNERGIES ET DELTA PRÉFABRICATION, NOTAMMENT, DISPOSE D'UN SAVOIR-FAIRE RECONNU DANS LE DOMAINE DE L'EAU, DE L'ÉNERGIE, ET DU BÉTON ARCHITECTONIQUE. LE GROUPE OPÈRE ÉGALEMENT EN PROMOTION IMMOBILIÈRE AVEC RAMPA RÉALISATIONS. PIERRE RAMPA, PRÉSIDENT DU DIRECTOIRE DE RAMPA ENTREPRISES, NOUS CONTE LA SAGA DE CETTE BELLE HISTOIRE DE FAMILLE, AVEC LA COMPLICITÉ DE BRUNO RAMPA, PRÉSIDENT DE LA DIVISION ÉNERGIES, DE PAUL ET MATTHIEU RAMPA, RESPECTIVEMENT DIRECTEUR GÉNÉRAL DÉLÉGUÉ DE RAMPA TRAVAUX PUBLICS ET PRÉSIDENT DE DELTA PRÉFABRICATION.

Dans les années 20, de nombreux maçons italiens s'installent en France. Parmi eux Jean Rampa, originaire de Tivoli, près de Rome, participe au creusement du tunnel du Rove. Puis il finit par s'installer à Chateaufrenard dans les Bouches du Rhône.

Il y crée une entreprise de maçonnerie qui évoluera plus tard vers les Travaux Publics et l'adduction d'eau. Quand il meurt brutalement en 1952 à l'âge de 51 ans, il emploie une dizaine d'ouvriers et a une réputation d'entrepreneur sérieux et compétent.

1- Chantier d'irrigation dans la plaine de l'Ain : un enjeu de la préservation de la ressource.

Cette année-là, son fils, Serge Rampa, a intégré HEC qu'il quitte en fin de deuxième année lors du décès de son père pour prendre sa suite et assurer la pérennité de l'entreprise. Il se sent désormais armé pour organiser et lancer l'entreprise de Travaux Publics.

En 1954, Liliane, sœur cadette de Serge Rampa, épouse François Péliissier, ingénieur des Arts et Métiers, qui quitte la Sade pour s'associer à Serge. Dans les années 70, la société se développe en créant d'autres activités par le processus du bourgeonnement : aux travaux d'adduction d'eau s'ajoutent ainsi la pose de lignes électriques et la création de réseaux de télécommunications.

En même temps, se développe une forte activité de bâtiments industrialisés. Est alors créée l'usine de préfabrication "Delta Préfabrication" à Privas.

Dans les années 80, suivront le rachat de Pompage Rhône-Alpes spécialisée dans l'hydraulique, Delta Électricité et le BERA (Bureau d'Études Rhône Alpes) qui viennent renforcer la branche énergie. La création de la branche promotion immobilière - Rampa Réalisations - apporte une diversification dans les activités du groupe.

2- Pierre Rampa, devant le buste en marbre de Serge Rampa.

3- La troisième génération Rampa avec, de gauche à droite, Pierre, Jean, Philippe et Marc.

4- La quatrième génération avec, de gauche à droite, Matthieu Rampa, Bruno Rampa, Pierre Hebrard Rampa, Paul Rampa.

© MARC MONTAGNON



2

PIERRE RAMPA : PORTRAIT

Né en 1956, Pierre Rampa est le troisième dans la lignée, après Jean Rampa et Marc Rampa.

Après un bac scientifique puis Sciences Eco à Lyon, il rejoint rapidement le terrain : pour lui l'entreprise est la vraie école de la vie, une école où l'on apprend tout.

Pierre Rampa dit avoir eu plusieurs précepteurs dans sa vie : son père Serge pour la rigueur du raisonnement, son oncle François Péliissier pour l'organisation technique de l'entreprise, des conducteurs de travaux et des anciens pour lui apprendre les ficelles du métier.

Il devient directeur financier de Rampa à l'âge de 25 ans avant de rejoindre la branche "canalisations" et de contribuer activement au développement de ses implantations à Lyon, notamment, un véritable challenge, et dans les Bouches-du-Rhône ainsi qu'à Grenoble et en Haute Savoie.

Pour Pierre Rampa, Rampa Entreprises est demeurée une entreprise familiale dont les capacités de réaction sont rapides et qui a su donner au fil des années une image de sérieux et de qualité.

De tout temps, il s'est également impliqué dans les instances professionnelles : Fédération Régionale des Travaux Publics, président de la chambre syndicale des Canalisateurs du Sud-Est depuis 2017, Cluster Indura, dont il a été le président-fondateur de 2009 à 2017.

Indura rassemble des acteurs économiques, techniques et scientifiques du monde des infrastructures de transport et de l'énergie autour d'un objectif commun : développer ensemble des solutions innovantes répondant aux enjeux sociétaux et environnements actuels.

Cela pourrait être aussi l'objectif de Rampa Entreprises dont il est président du directoire depuis 2009 et de Rampa Travaux Publics aux destinées de laquelle il préside depuis 1990.

Les quatre fils de Serge assurent la relève à la tête de ce qui devient dans un premier temps Rampa Frères.

Jean Rampa est en charge des deux entreprises de réseaux secs : Rampa Énergies et Communications et Delta Électricité, de l'usine de préfabrication et du bureau d'études BERA.

Marc Rampa, crée l'activité promotion immobilière avec Rampa Réalisations qui construit des logements et des bureaux et acquiert des terrains à bâtir.

Pierre Rampa dirige l'activité "réseaux humides" au travers de Rampa Travaux Publics et Pompage Rhône-Alpes.

Philippe Rampa assure la gestion administrative et financière de l'ensemble, ainsi que la direction de REM, pôle "carrières et recyclage".

En 2002, Serge Rampa prend sa retraite après 50 ans de présence mais reste néanmoins président du conseil de surveillance du groupe qui a été transformé en société à directoire. Il décède le 15 novembre 2013 à l'âge de 84 ans.

AUJOURD'HUI : 500 PERSONNES, 90,9 M€ DE CHIFFRE D'AFFAIRES

En 2019, le groupe Rampa est organisé en cinq grandes unités :

- Le pôle Eau, Rampa TP et Pompage Rhône Alpes, présidé par Pierre Rampa (51,6 M€ de chiffre d'affaires) ;
- le pôle Énergie, dont le responsable est Bruno Rampa (18,3 M€ de chiffre d'affaires) ;
- Delta Préfabrication, présidée par Matthieu Rampa (5,2 M€ de chiffre d'affaires) ;
- Rampa REA présidée par Marc Rampa (13,7 M€ de chiffre d'affaires) ;
- REM, placée sous la responsabilité de Philippe Rampa.



3

© RAMPA



4

© MARC MONTAGNON

En 2013, l'entreprise installée depuis 60 ans au Pouzin, en Ardèche, traverse le Rhône pour se déployer dans le Parc industriel Rhône Vallée.

Son siège social y occupe 2400 m² de bureaux et trois hectares de plates-formes équipés de trois bâtiments de 1000 m² chacun.

Cette implantation moderne permet au groupe de poursuivre sa croissance. Il est présent dans le quart sud-est de la France (Rhône-Alpes, Bourgogne, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon) avec un réseau d'agences : Lyon, Miramas, Grenoble, Feigères en Haute Savoie et Montpellier.

Le développement se fait sur de véritables expertises, comme par exemple les conduites forcées, les réseaux d'énergie, les bétons architectoniques et les bétons fibrés à ultra-hautes performances.

Pour la promotion, il s'agit de la construction de logements labellisés "effinergie" ou d'aménagements d'éco-quartiers.

POMPAGE RHÔNE-ALPES : TOUS LES CRÉNEAUX

Dans le domaine du pompage, Pompage Rhône-Alpes intervient pratiquement dans tous les créneaux avec des résultats qui confirment son implication : le chiffre d'affaires de PRA est passé de 1,8 M€ en 2015 à 2,7 M€ en 2018.

Parmi ses réalisations récentes, un chantier pour le compte du Syndicat Rhône Ventoux (maître d'ouvrage) consistant à équiper dans le Vaucluse un réservoir d'eau potable de 5000 m³ en tuyauterie inox ø 400 et ø 500 ainsi que des travaux électromécaniques pour le traitement d'eau pour un débit de 600 m³/h.

SECTEUR EAU POTABLE : équipement de réservoir, tuyauterie inox et fonte, station de pompage, surpresseur, transfert ou forage. Référence chantier pour débit 440 m³/h à 36 bars.

SECTEUR IRRIGATION : Construction de station de pompage pour irrigation. Réalisation récente : La station d'Izeron dans l'Isère : 870 m³/h à 22 bars. Réalisation en cours : Station SIEPIA : 3600 m³/h à 21 bars.

SECTEUR EAUX USÉES : Poste de refoulement béton ou polyester, mise en place en présence de nappe. Débit jusqu'à 800 m³/h.

SECTEUR AUTOMATISME : Installation d'armoire de commande, système de télégestion, supervision.

SECTEUR EAUX PLUVIALES : Équipement de Bassin d'Orage d'une capacité jusqu'à 5000 m³ et de station de pompage jusqu'à 1 m³/s.

TRAVAUX PUBLICS : 6 SPÉCIALITÉS DANS LE DOMAINE DE L'EAU

Rampa Travaux Publics constitue le fer de lance du groupe ardéchois. Cette entité a réalisé en 2018 un chiffre d'affaires de 49 M€ et emploie 284 personnes dans les agences de Feigères,

5- Conduite forcée de la microcentrale hydroélectrique d'Eyguières sur le canal de Craponne.

6- Chantier d'adduction d'eau potable à Le Pouzin.

7- Conduite forcée sous un chemin forestier pour la minicentrale en aval du village de La Grave, au pied de la Meije.

8- Station de pompage de La Jouve à Sorgues dans le Vaucluse.





9



10



11

Grenoble, Le Pouzin, Lyon, Montpellier et Miramas. Autour de Pierre, l'équipe de direction est composée de Pierre Chadoin, directeur général et Paul Rampa, directeur général délégué.

« Nous venons de réaliser un nouveau développement géographique dans les Alpes Maritimes, précise Pierre Rampa, secteur dans lequel nous n'étions pas présents, avec la création d'une sixième agence à proximité de Cannes. Nous réalisons d'ailleurs à Cagnes-sur-Mer les travaux de transfert de l'ancienne station d'épuration à la nouvelle sous-maîtrise d'ouvrage de Nice Métropole. Ce chantier de 12 mois consiste en la pose de 4 000 m de canalisations en diamètre 600 mm et 700 mm ».

L'activité de Rampa TP s'établit autour de 6 métiers avec une prépondérance dans le domaine des canalisations :

- Réseaux sous pression (40%) : eau potable, irrigation, industrie ;
- Réseaux gravitaires (35%) : eaux usées, eaux pluviales ;
- Conduites forcées (10%) : hydro-électricité ;
- Travaux environnementaux (7%) : travaux en rivières ;
- Réseaux de chaleur (5%) ;
- Désamiantage (3%).

« La construction de réseaux d'eau potable constitue la majeure partie de nos travaux de réseaux pression. Nous travaillons pour des maîtres d'ouvrage importants comme le Grand Lyon, la Métropole de Marseille, et même plus loin, tels Eau de Paris, indique Pierre Rampa. Le transport d'eau brute fait également partie de ces travaux, notamment, les réseaux d'irrigation

9- Mise en place de conduites pour Grand Lyon Métropole dans le cadre du réaménagement de La Part Dieu.

10- Travaux d'aménagement du quartier du Puisoz - Grand Parilly à Vénisieux.

11- Une équipe du bureau d'études BERA en opération sur un chantier.

12- Travaux réalisés pour le tramway d'Aubagne.

dans l'Ain, le Vaucluse, le Canal de Provence dans le Var et le Bas-Rhône Languedoc dans l'Hérault. Ils font appel à notre savoir-faire pour des réseaux de gros diamètre ».

« Nos équipes sont capables de travailler sur tous les matériaux (fonte, acier, âme tôle, PVC, PEHD, PRV) en site urbain, rural ou industriel. »

« Dans le domaine des réseaux gravitaires, nous construisons des canalisations d'eaux usées et pluviales. Qu'ils soient unitaires ou séparatifs nos réseaux de toutes tailles (jusqu'à Ø 2200) couvrent un éventail très large de matériaux (béton, PVC, fonte, acier, PRV, polypro, PEHD, grès) ».

Depuis quinze ans, Rampa TP s'est spécialisée dans les conduites forcées : avec l'appui de partenaires efficaces

et sûrs (travaux acrobatiques, pelles araignées, hélicoptage, génie-civil), l'entreprise réalise en terrain difficile et montagneux des canalisations en PRV, fonte et acier destinées à la production hydroélectrique. Dans cet esprit, ses équipes sont capables d'étudier tout projet de réseaux spéciaux (encorbellement, grande profondeur...).

De plus, l'entreprise maîtrise la construction de réseaux de transport d'eau chaude destinés à alimenter des systèmes de chauffage urbain, comme actuellement à Aix en Provence pour Cofely.

Afin de diversifier son offre, Rampa TP intervient également depuis peu dans le secteur du désamiantage (certifiée sous-section 3 et 4).

Dans son bureau d'études, quatre ingénieurs dédiés répartis dans les agences permettent de couvrir l'ensemble de la zone d'activité de l'entreprise.

Par ailleurs, la cellule "topographie" maîtrise la conception des réseaux hydrauliques que ce soit en forte pression ou en réseau gravitaire. Son travail consiste dans un premier temps à accompagner les équipes de chantiers en réalisant des plans d'exécution et des implantations sur sites et dans un second temps à dessiner les plans de récolement pour finaliser les dossiers.

POMPAGE RHÔNE-ALPES : TOUTE LA CHAÎNE

Dans le domaine du pompage, les travaux de Pompage Rhône Alpes, s'étendent de l'installation des équipements jusqu'à l'obtention des visas des procédures administratives. ▷



12

© RAMPA

Une phase d'accompagnement de remise d'ouvrage peut suivre en fonction de la complexité du projet. Cela concerne la construction de poste de relèvement, de station de pompage pour l'eau potable ou l'irrigation. La direction technique de l'entreprise est assurée par Jean-Philippe Laurent.

CONDUITE FORCÉE DE LA GRAVE : UN CHANTIER-TYPE

Parmi de multiples chantiers du quotidien, il en est qui mettent en évidence la diversité des compétences de l'entreprise en matière de terrassement, de pose de canalisations et de génie civil. C'est le cas de l'une de ses dernières réalisations d'envergure : la construction de la conduite forcée de la Grave, dans les Hautes Alpes, pour le compte d'Hydrowatt.

Cette conduite forcée de 4200 mètres de longueur en bordure du parc national des Écrins alimente en eau de la Romanche la centrale hydroélectrique de la Meije située à 1700 mètres d'altitude pour assurer une production annuelle de 12 millions de kWh.

Compte tenu de la topographie du site et des précautions liées au respect de l'environnement, les détails techniques de réalisation de l'opération ont nécessité une mise au point d'à peu près un an et le chantier a démarré en mai 2017. Il s'est poursuivi jusqu'à l'arrivée de l'hiver et a repris au printemps 2018 pour s'achever en octobre de la même année, l'objectif étant de mettre en route l'installation début 2019. Il existait déjà des voies d'accès ce qui a évité d'exécuter des terrassements lourds tout en permettant d'installer une conduite de diamètre conséquent, constituée de tuyaux de grande longueur en portant le plus faible préjudice à l'environnement.

« Dans un premier temps, précise Pierre Rampa, il nous a fallu convaincre les autorités que les impacts environnementaux étaient réduits et largement compensés par la réalisation de la conduite. Dans un second temps, nous avons mis au point la technique pour la préparation du terrain et la pose des tuyaux. Il s'agit de tuyaux en fonte ductile emboîtés les uns dans les autres, sans soudure, capable d'absorber une déviation angulaire suffisante compatible avec la dénivelée de terrain. Elle est conçue par ailleurs pour absorber des mouvements de sol sans conséquence pour son étanchéité ».

La canalisation est composée de 2000 m de tuyaux en diamètre 1600 mm et de 2000 m de tuyaux en



13



14

© RAMPA

diamètre 1400 mm ce qui représente 500 tuyaux de 8,25 m de longueur et d'un poids de 7 à 7,5 t.

Une particularité intéressante pour réduire les phases de transport : les tuyaux 1400 sont emboîtés dans ceux de 1600 ce qui a permis de ramener le nombre des rotations de camions de 500 à 250.

« L'une des difficultés tenait au fait que les emprises de chantier étaient réduites, poursuit Pierre Rampa, et que la largeur des pistes ne permettait aux camions ni de stationner ni de faire demi-tour, ce qui impliquait de longues marches arrière en jonglant avec la sinuosité des pistes et la pré-

13 & 14- Intervention aérienne d'une équipe de Rampa Énergies en Corse.

sence d'arbres de part et d'autre des bas-côtés ».

Les matériaux extraits étaient concassés et criblés sur place dans une installation mobile avant d'être réacheminés sur le chantier pour en effectuer la fermeture.

Les terrassements de la prise d'eau et la dérivation de la Romanche ont

été effectués à la cote définitive lors de la première année ce qui a permis de bénéficier des enseignements d'une longue période d'observation sur la stabilité des sols et la capacité de la dérivation à assumer tous les débits pour les phases de génie civil de la deuxième année, notamment la construction du bâtiment abritant la centrale hydro-électrique au fil de l'eau Hydrowatt, dont le fonctionnement est entièrement automatique.

En cumulé, le chantier, en groupement avec Sogea, aura duré 11 mois. Il a coûté 11 M€ financés en totalité par Hydrowatt et va générer de l'ordre de 1 million d'euros par an de chiffre d'affaires.

ÉNERGIE : RÉPARTITION PAR MÉTIERS

Si la répartition géographique de l'activité énergie de Rampa met en évidence une très forte prééminence de la Drôme (31%) et de l'Ardèche (49%), pour des raisons de proximité d'intervention évidentes, la répartition par métiers s'avère beaucoup plus diversifiée :

- Réseaux souterrains : 31%,
- Électrification rurale : 30%,
- Réseaux aériens : 12%,
- Éclairage public : 12%,
- Branchements : 5%,
- Fibres optiques : 5%,
- Gaz : 5%.

RAMPA ÉNERGIES : 24 HEURES SUR 24

Bruno Rampa a succédé à Jean Rampa à la tête de Rampa Énergies en 2017. Depuis 1980, Rampa Énergies se situe comme une entreprise au cœur de la transition énergétique et numérique. L'entreprise emploie 130 collaborateurs et a réalisé en 2018 un chiffre d'affaires de 17,5 millions d'euros, en progression continue de 2% à 2,5% par an depuis 2015. Il est secondé par Julien Betriu, directeur général.

À la différence de Rampa TP qui est organisée par agences, Rampa Énergies l'est par activité autour de trois



15

© CLAUDE FOUGEIROL

grands métiers : les réseaux d'énergie (aériens et souterrains), les services (maintenance et travaux neufs éclairage public, branchements gaz et électriques), les réseaux à très haut débit (Déploiement de la fibre optique).

« Dans ce troisième domaine, précise Bruno Rampa, nous avons des perspectives de développement pour au moins 10 ans, dans le cadre du plan France Très Haut Débit et notamment du programme de déploiement lancé par ADN (Ardèche Drôme Numérique). Nous avons déjà réalisé, lors du premier déploiement, 100 kilomètres de réseaux de fibres optiques sur l'axe nord-sud de la vallée du Rhône. Pour le projet Ardèche Drôme Numérique, les travaux consistent à installer 310 000 prises sur 642 communes de la Drôme et de l'Ardèche ».

Mais l'essentiel de l'activité de Rampa Énergies se situe encore dans son métier historique liés aux travaux de distribution d'énergie, en aérien et en souterrain, tant pour le compte d'Enedis que pour les syndicats départementaux d'énergie (l'Ardèche, la Drôme, le Rhône et l'Isère). Les interventions concernent aussi bien le remplacement et l'entretien des réseaux existants que la création de nouvelles lignes de distribution.

Spécialisé particulièrement dans les travaux aériens, du 34 mm² au 148 mm², cinq équipes de monteurs habilités réalisent des travaux de renforcement et de prolongement de durée de vie des réseaux électriques, de dépannage et d'astreinte sur un large quart Sud-Est de la France, ainsi que sur la Corse. Chaque année, Rampa Énergies conçoit et construit 100 km de réseaux. Son service "branchements électriques" réalise pour Enedis plus de 1 000 branchements par an. Il en est de même au niveau des réseaux et branchements de gaz dans la Drôme et dans l'Ardèche.

15- Illumination du pont routier du Pouzin sur le Rhône.

16- Parc éolien et centrale photovoltaïque en bordure du Rhône.

À ceci s'ajoutent les travaux importants liés à l'électrification rurale ainsi que l'éclairage public.

De la conception à la réalisation, Rampa Énergies s'est spécialisée dans l'éclairage public.

Avec plus de 25 000 points lumineux en maintenance, elle propose des solutions de gestion intelligente de l'éclairage, avec astreinte 24 heures sur 24 ainsi que des illuminations pour les fêtes de fin d'année.

ÉNERGIES RENOUVELABLES : DEMAIN EST DÉJÀ LÀ

Rampa Énergies a déjà participé à la construction de 10 MW de production d'énergie éolienne et 35 MW de production d'énergie photovoltaïque, pour la CNR (Compagnie Nationale du Rhône).

En fait, depuis 2009, elle accompagne les producteurs d'énergies renouvelables dans la construction de leurs projets éoliens et photovoltaïques.

Consciente des enjeux liés à ces nouvelles formes d'énergie, elle est par ailleurs devenue depuis 2015 productrice d'énergie photovoltaïque pour ses propres projets.

Un nouveau métier a également vu le jour depuis deux ans : à savoir l'installation, le raccordement ainsi que la mise en service de bornes de recharge pour véhicules électriques pour les projets publics et privés.

UN BUREAU D'ÉTUDES ASSOCIÉ

Le bureau d'études Bera est associé à Rampa Énergies. Il est spécialisé en réseaux électriques aériens ou souterrains, gaz ou éclairage public et dispose des outils informatiques les plus récents pour répondre aux demandes de ses clients : Camélia, Autocad - Microstation - Eras/Atlas QGIS, Dialux-Caneco ep - Editop. Il est certifié V 3 Mercator/ dessin et se compose de sept personnes aux études, deux en cartographie/récolement et deux dessinateurs.

La cellule "études de prix" analyse les dossiers d'appel d'offre afin d'apporter la réponse la plus pertinente et la plus compétitive tant sur le plan technique que financier.

DELTA PRÉFABRICATION : L'ART DES BEAUX BÉTONS

Installée à Privas, préfecture de l'Ardèche, sur un site de 4 hectares, Delta Préfabrication est présidée par Matthieu Rampa. L'usine emploie une cinquantaine de personnes et a réalisé en 2018 un chiffre d'affaires de 5,2 M€. Les produits dont elle assure la conception en 3D et la fabrication ainsi que la livraison dans toute la France sont ce que l'on peut qualifier de "bétons d'exception", tant au plan esthétique que structurel. Il s'agit de panneaux sur mesure, porteurs ou non porteurs, pouvant intégrer une isolation, en béton classique, en BFUP, de toutes teintes, textures et aspects de surface, fabriqués à partir de granulats provenant essentiellement de la carrière de Rous-sas, près de Montélimar.

Delta Préfabrication dispose d'un laboratoire d'essais et d'échantillons auquel sont associés trois halls de fabrication, un hall de polissage, deux grues à tour pour les manutentions et deux centrales à béton.



16
© RAMPA



17



18

© RAMPA



19



20

© RAMPA

Un important projet de modernisation est en cours dont la réalisation interviendra en 2019 et 2020 visant à moderniser et agrandir les installations, tout en améliorant le confort de travail des équipes. Il a également pour objectif de gagner en productivité et en qualité. Le projet consiste à couvrir en totalité la zone de stockage des produits finis par une superstructure métallique sur laquelle seront installés 1 000 m² de panneaux photovoltaïques. Par ailleurs, les manutentions des panneaux seront assurées par des ponts roulants en lieu et places des grues à tour, dans un hall unique afin d'optimiser les flux de production. À la suite de cette transformation, la capacité de production de l'usine pourra passer de 5,5 M€ à 10 M€ de chiffre d'affaires annuel. L'aspect esthétique de la production de l'usine de Privas constitue un critère essentiel de sa démarche : béton sérigraphié pour reproduire une image, béton poli pour donner l'apparence et la brillance du marbre ou du granit, béton désactivé ou lavé pour faire apparaître les granulats, béton sable, traité à l'acide ou bouchardé pour un aspect similaire à la pierre.

La qualité de la production vaut à Delta Préfabrication de travailler dans toute la France avec des donneurs d'ordre réalisant des constructions d'exception. À titre d'exemple : le domaine départemental pierrevives à Montpellier (architecte : Zaha Hadid), l'îlot Desaix à Lyon avec Fontanel (architecte : Clément Vergely Architectes), le Riant Park à Genève avec Implenla (architecte : Cerutti architectes), le Crédit Agricole Sud Rhône-Alpes de Grenoble avec Eiffage Construction (architecte : Groupe 6), l'immeuble Stella à Monaco avec J.B. Pastor & Fils (architectes :

Jean-Pierre Lott et Alexandre Giraldi). L'année 2019 verra la réalisation du chantier Sytral à Lyon avec Léon Grosse (architecte : Ferrand-Sigal Architectes & Associés) ainsi que du complexe multi-activités CP de la Bergère à Genève avec Implenla (architecte : De Giuli & Portier).

POUR L'AVENIR, DES OBJECTIFS DIVERSIFIÉS

Les réalisations ne manquent pas. Les projets non plus. Dans le domaine de l'énergie, l'objectif est de développer l'activité "travaux aériens", la gestion

17- La façade en béton architectonique de l'un des immeubles de l'îlot Desaix à Lyon.

18- L'immeuble Stella à Monaco avec ses balcons en béton architectonique fabriqués par Delta Préfabrication.

19- Le domaine départemental " pierrevives " à Montpellier en béton architectonique.

20- Le siège du Crédit Agricole Sud Rhône-Alpes à Grenoble : autre réalisation de Delta Préfabrication.

21- Panneaux de béton architectonique à isolation intégrée pour le Riant Park à Genève.



21

© RAMPA



22

© RAMPA

et le pilotage de l'éclairage public, et le déploiement de la fibre optique. Dans celui des Travaux Publics, priorité sera donnée à la sécurité, au renforcement des équipes de production avec des recrutements prioritaires pour les agences de Miramas, Grenoble et Feigères, en poursuivant la politique de formation interne et en développant les métiers du service. La réussite de l'implantation dans les Alpes Maritimes, autour des métropoles de Cannes et de Nice fait également parties des challenges à réussir. Enfin les métiers de l'immobilier par le développement sur le grand quart

22- La promotion 2016 " Serge Rampa " de l'EATP d'Égletons reçue au siège du groupe Rampa au Pouzin.

23- L'édition spéciale du " Dauphiné libéré " réalisée à l'occasion des 80 ans de l'entreprise.

Sud-Est amène de l'activité au groupe et permettent une diversification importante en matière de lotissements, de logements et de bureaux. □

FORMATION : UNE PRÉOCCUPATION DE LONGUE DATE

Depuis de nombreuses années, le groupe Rampa a fait le constat que la formation interne est un élément essentiel de la pérennité d'une entreprise. L'effort consenti par ses dirigeants pour l'apprentissage permet à l'entreprise d'assurer un renouvellement constant de son personnel, avec des compétences adaptées à ses besoins.

Concernant l'activité " réseaux humides " (Rampa TP et PRA), elle compte à ce jour 18 apprentis répartis sur des cursus de tous niveaux : CAP canalisateur, Bac Pro TP, BTS TP, licence et ingénieur.

Rampa a fait le choix de former ses collaborateurs sur des formations spéciales tant sur le thème de la technique de chantier que sur celui de la sécurité afin de s'adapter en permanence aux nouvelles méthodes et réglementations.

À noter que la promotion 2016 de l'EATP d'Égletons, École d'Application aux Métiers des Travaux Public, porte le nom de Serge Rampa. Un hommage qui fait honneur au créateur de l'entreprise.



23 © DR



1
© FRANCIS VIGOUROUX

L'ARCHE DE CHERNOBYL : UNE STRUCTURE GIGANTESQUE POUR ASSURER UN CONFINEMENT

AUTEUR : DENIS ÉTIENNE, DIRECTEUR ADJOINT BUREAU D'ÉTUDES, BOUYGUES TP

L'ARCHE DE CHERNOBYL EST UNE STRUCTURE TREILLIS EN ACIER, EN FORME D'ARC REPOSANT SUR DES FONDATIONS PROFONDES. ELLE COUVRE LE SARCOPHAGE QUI A ÉTÉ CONSTRUIT SUR LE RÉACTEUR N°4 DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE, SUITE À L'ACCIDENT SURVENU EN AVRIL 1986. D'UNE DURÉE DE VIE DE 100 ANS, ELLE DOIT ASSURER LE CONFINEMENT ET PERMETTRE LE DÉMANTÈLEMENT DU RÉACTEUR ACCIDENTÉ. ÉTANT DONNÉ LE NIVEAU DE RADIOACTIVITÉ, L'ARCHE EST CONSTRUITE DANS UNE ZONE SPÉCIALEMENT PRÉPARÉE, À PLUS DE 200 m À L'OUEST DU RÉACTEUR. SES 36 000 t SONT ENSUITE POUSSÉES AU-DESSUS DU SARCOPHAGE.

INTRODUCTION

La centrale de Chernobyl est située à environ 100 km au nord de Kiev, en Ukraine. Elle comporte 4 réacteurs dont l'unité 4 accidentée le 26 avril 1986. Près de 4 000 personnes travaillent toujours sur le site pour la surveillance et l'entretien de l'unité accidentée et des 3 autres réacteurs, ainsi que pour la décontamination du site. À la suite de l'accident de l'unité 4,

un sarcophage composé de structures en béton et métalliques a été construit en urgence par les Russes. Ce sarcophage, malgré les nombreux travaux de stabilisation et de réparation effectués par le passé, présente aujourd'hui un risque inacceptable d'effondrement. Une nouvelle enceinte de confinement couvrant ce sarcophage a donc dû être réalisée par Novarka (JV composée de Vinci GP - Bouygues TP).

1 - Séquence construction - 2^e hissage.

1 - Construction séquence - second hoisting.

Elle est composée d'une structure treillis métallique en forme d'arche, longue de 162 m, d'une hauteur de 100 m, pour une portée de 256 m. Un des challenges de ce projet, outre la construction sur un site aussi radioactif, est de concevoir cet ouvrage pour une durée de 100 ans sans aucune opération de maintenance programmée, étant donné le niveau de radioactivité extrêmement élevé.

L'ACCIDENT DE 1986 - LE SARCOPHAGE

Le 26 avril 1986 s'est produite la plus grande catastrophe du nucléaire civil de l'histoire, l'explosion du réacteur n°4 de la centrale de Chernobyl.

Un sarcophage provisoire (*Object Shelter*) a été construit en urgence, entre mai et novembre 1986, afin de confiner les restes du réacteur n°4 et notamment les poussières hautement radioactives. Sa durée de vie initialement prévue était de 15 ans.

2- Schéma du sarcophage.

3- Maquette numérique de l'arche avec tous ses équipements.

2- Diagram of the sarcophagus.

3- Computer model of the arch with all its appurtenances.

La conception et la réalisation de ce sarcophage ont constitué un véritable exploit effectué par des ingénieurs russes et les "liquidateurs", les "ouvriers de l'enfer".

Il est constitué de 400 000 t de béton et 7 000 t de structures en acier.

Le mur Nord détruit de l'unité 4 a été remplacé par un épais mur en béton en forme d'escalier. Le toit est composé de tôles métalliques et tubes en acier supportés par des poutres en acier (figure 2).

Aujourd'hui, près de 25 ans plus tard, le sarcophage est sérieusement dégradé sous l'effet des intempéries et des radiations. Malgré des travaux continus de renforcement et stabilisation, il menace de s'écrouler. La chute d'éléments pourrait alors provoquer la formation d'aérosol chargé de poussières hautement contaminées.

LA NOUVELLE ARCHE (NEW SAFE CONFINEMENT)

Il était donc urgent de réaliser une nouvelle enceinte de confinement, recouvrant le sarcophage provisoire et le réacteur n°4.

Cette nouvelle enceinte, en forme d'arche, a deux fonctions principales :

- Protéger le sarcophage existant des actions climatiques et assurer le confinement des poussières radioactives, notamment lors des phases de démantèlement ;
- Permettre le démantèlement des parties instables du sarcophage provisoire, l'enlèvement des déchets radioactifs et du combustible nucléaire.

Le NSC (*New Safe Confinement*) ne protège pas des rayonnements (radioactivité gamma), une telle protection nécessiterait des épaisseurs de béton ou d'acier trop importantes.

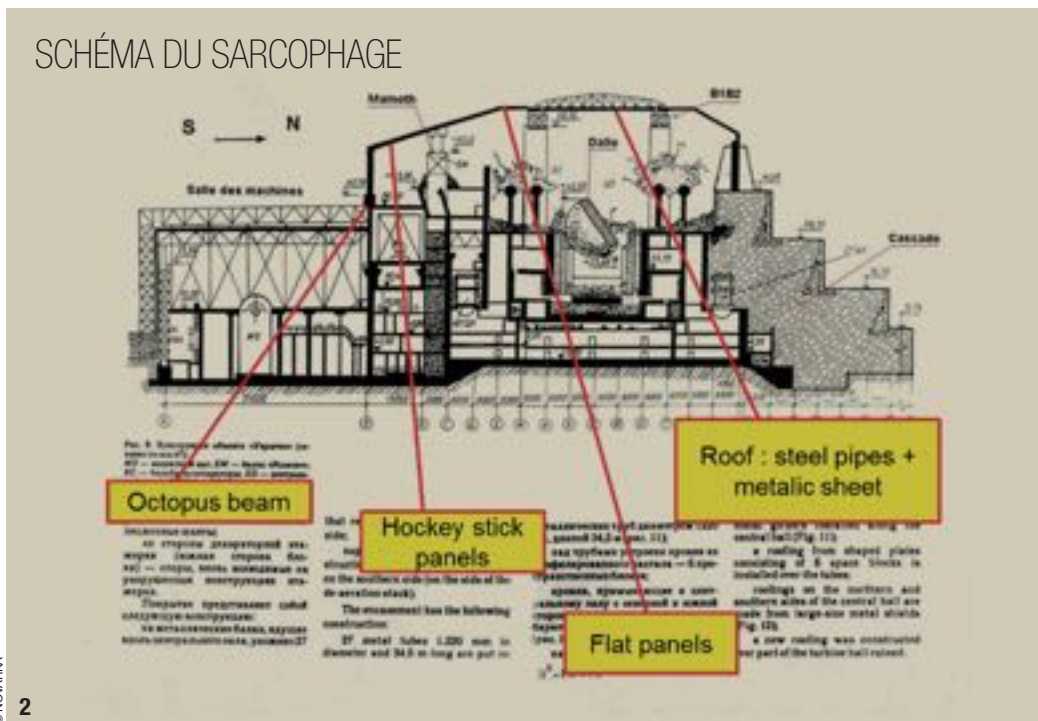
Le NSC est une véritable usine de démantèlement, avec des exigences de confinement, devant être construite sur une "poubelle" à ciel ouvert remplie de déchets nucléaires.

L'arche, en plus de la structure métallique proprement dite, contient tous les systèmes et équipements nécessaires pour son instrumentation, son exploitation et les futures opérations de démantèlement. Cela inclut un bardage étanche, une membrane souple pour réaliser l'étanchéité avec les bâtiments existants, un système d'instrumentation, un circuit électrique, un système de contrôle commande et deux énormes ponts roulants d'une portée de 100 m (figure 3).

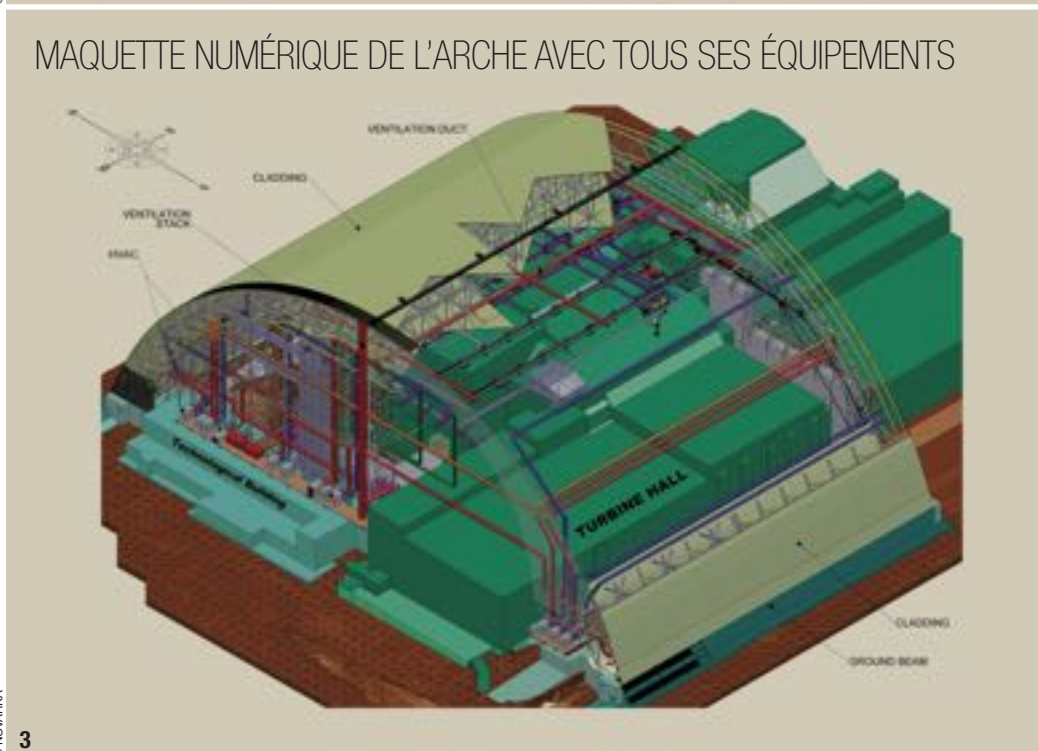
Un bâtiment est également construit sur la face Ouest du NSC, pour l'accès contrôlé des ouvriers, les vestiaires et pour toutes les opérations de maintenance et traitement des éléments radioactifs démantelés.

LA STRUCTURE MÉTALLIQUE

La structure métallique est composée de 16 arches portant dans la direction Nord-Sud (256 m) et de 2 murs à l'est et à l'ouest venant fermer le NSC sur les bâtiments existants de l'unité 4 (figure 4).



© NOVARKA
2



© NOVARKA
3

4- Section courante d'une arche et vue 3D de l'arche côté mur Ouest.

5- Ponts roulants (en jaune) suspendus en haut de l'arche.

6- Coupe longitudinale de l'arche.

4- Standard section of an arch and 3D view of the arch at the West wall end.

5- OT cranes (in yellow) suspended at the top of the arch.

6- Longitudinal section of the arch.

Les 16 arches reposent sur 2 longrines en béton d'une largeur comprise entre 10 m et 11,50 m et fondées sur 350 pieux en béton armé (diamètres 1 000 mm, réalisés à la tarière creuse). Elles sont espacées de 12,50 m, excepté pour les arches supportant les murs (2 arches par mur) : 8 m pour les 2 arches du mur Ouest et 4 m pour les 2 arches du mur Est.

Chaque arche est constituée par un treillis de 12 m de hauteur composé de tubes circulaires creux de diamètre compris entre 813 mm et 400 mm, et comprend 2 membrures inférieure et supérieure reliées par des diagonales et montants. L'épaisseur des tubes varie de 12 mm à 40 mm.

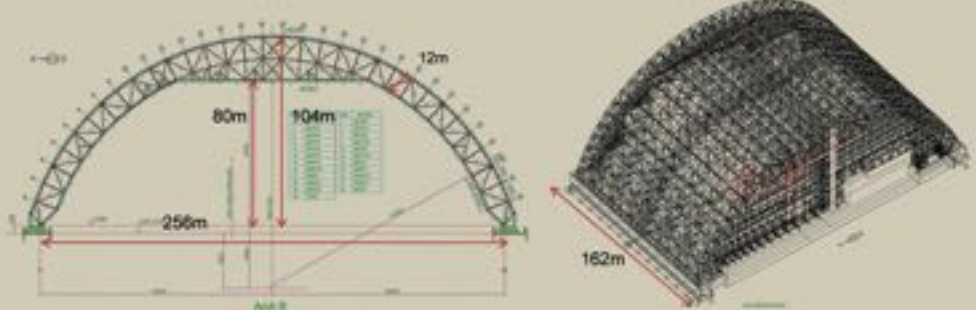
En partie haute des arches, un plan horizontal, constitué aussi par un treillis métallique, est supporté par ces arches, et sert de support pour les poutres de roulement des ponts roulants (figure 5). Les arches sont reliées entre elles par des poutres treillis longitudinales, assurant un contreventement au niveau des membrures inférieures et supérieures et au niveau du plan horizontal.

Le mur Ouest est bloqué longitudinalement en partie basse avec des appuis fixes et supporté verticalement par un poteau, permettant ainsi de soulager les arches A0 et A. Ces appuis sont fixés sur le toit du nouveau bâtiment construit dans l'emprise de ce mur Ouest (figure 6).

Le mur Est est entièrement suspendu aux 2 arches d'extrémité (N et NO).

Les tubes aciers de la charpente métallique sont en acier de nuance S355, finis à chaud pour les diamètres inférieurs ou égal à 406 mm et finis à

SECTION COURANTE D'UNE ARCHE ET VUE 3D DE L'ARCHE CÔTÉ MUR OUEST



4

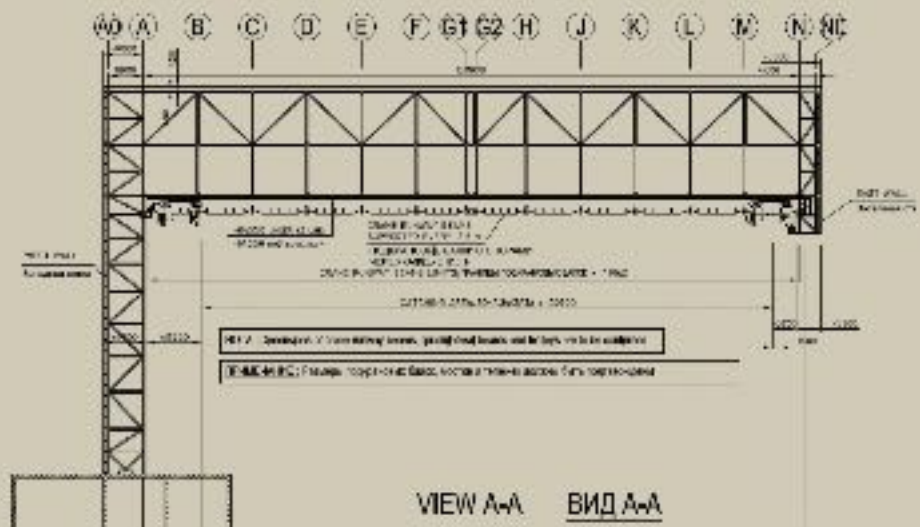
© NOVARKA



5

© NOVARKA

COUPE LONGITUDINALE DE L'ARCHE



6

© NOVARKA



© BOUYGLIÈS TP
7

froid pour les diamètres supérieurs à 406 mm.

La connexion des tubes en acier est réalisée par des assemblages boulonnés précontraints avec des tôles éclisses en acier S355 (figure 7).

Ces nœuds de liaison sont constitués de goussets soudés sur les tubes (pénétration partielle ou totale), et de 1 à 3 plaques centrales (selon les efforts à reprendre), la connexion entre goussets et plaques centrales se

7- Assemblage boulonné.

8- Vue des panneaux rabattables en position relevée.

7- Bolted assembly.

8- View of the folding panels in raised position.

faisant par des éclisses boulonnées. Les boulons (environ 350 000 au total), du type TCB (*Tension Control Bolts*), diamètre 30 mm, sont en acier galvanisé à chaud.

Un réseau de pannes fixées aux arches et sur les deux murs et espacées entre elles de 2,75 m sert de support aux bacs acier des bardages intérieurs et extérieurs.

Ces pannes, en acier galvanisé à chaud, de nuance S355, sont constituées de

profilés rectangulaires creux (RHS). Le poids total de la charpente métallique (incluant les pannes) est d'environ 23 000 t.

LES PANNEAUX RABATTABLES DU MUR EST

Étant donné le niveau de radioactivité dans la zone de l'unité 4, l'arche est construite dans une zone spécialement préparée à plus de 200 m, afin de limiter l'exposition des ouvriers. Lors de son poussage au-dessus du sarcophage, le mur Est doit passer les obstacles constitués par les bâtiments existants de l'unité 4 et le sarcophage lui-même et épouser en position finale le contour de l'unité 4.

Cela a nécessité la conception de panneaux rabattables, en position relevée lors du poussage de l'arche et qui sont ensuite rabattus et fixés au mur Est par des systèmes les plus automatiques possible étant données les conditions radioactives de la zone.

Ces panneaux rabattables, jusqu'à 30 m de haut (figure 8), sont constitués également de treillis métalliques et connectés au mur Est avec des joints étanches.

Ils sont basculés à leur position finale et liaisonnés grâce à des treuils et des vérins contrôlés à distance.

CONSTRUCTION DE L'ARCHE

Le site de construction est divisé en 3 zones (figure 9) : celle d'assemblage (vert), celle d'attente (orange) et celle du sarcophage (bleue).

La structure est assemblée en deux parties (parties Est et Ouest). La partie Est est d'abord construite sur la zone de montage, en utilisant des éléments pré-assemblés et des tours de levage conçues pour hisser des charges de plus de mille tonnes, suivant la séquence décrite ci-dessous.

Les premiers segments (partie haute de l'arche) sont pré-assemblés au sol, puis reliés entre eux par les éléments de contreventements.

Les deuxièmes segments sont ensuite connectés à cette partie centrale par un système de rotules, puis on effectue le premier hissage.

La structure est ainsi progressivement assemblée en répétant le même type d'opérations (figure 1).

Le mur Est est ensuite assemblé. Cette première moitié (Est) d'arche est poussée dans la zone d'attente afin de permettre la construction de la seconde moitié (Ouest) de l'arche avec la même méthodologie.



© NOVARKA
8

Cette seconde demi-arche terminée, la première moitié est repoussée en arrière pour pouvoir effectuer la connexion physique entre les deux. Les 2 ponts roulants assemblés au sol sont alors hissés à l'aide de vérins à câble accrochés à la structure de l'arche, 85 m au-dessus du sol. À noter que le bardage est installé au fur et à mesure de la construction des deux demi-arches. Après installation finale de tous les équipements, l'arche est prête pour son ripage final (figure 10).

LE POUSSAGE DE L'ARCHE

Le NSC, d'un poids total d'environ 36 000 t, est glissé sur 327 m en utilisant des vérins jusqu'à sa position finale au-dessus du réacteur de la tranche 4 (figure 11).

Sous chaque pied d'arche, 4 vérins hydrauliques verticaux soutiennent le poids de la structure et 4 vérins pousseurs-tireurs sont utilisés pour la déplacer, soit un total de 116 vérins de chaque type (figure 12).

La vitesse de translation maximale est de 10 mètres par heure. Le système se déplace sur des rails avec des plaques en téflon pour réduire le frottement.

LE BARDAGE

La structure métallique est "enfermée" dans un espace clos ventilé, l'espace



9 © NOVARIKA

annulaire, délimité par les bardages intérieurs et extérieurs.

Cet espace annulaire est mis en surpression (+50 Pa) afin d'assurer le confinement du volume principal recouvert par l'arche (unité n°4 et sarcophage).

Ce volume principal est mis en légère dépression (-50 Pa) par rapport à l'extérieur (figure 13).

Afin de limiter les apports d'air pour tenir cette surpression, les deux bar-

9- Les 3 zones du site de construction.

10- Vue aérienne de l'arche avant poussage final.

9- The 3 areas of the construction site.

10- Aerial view of the arch before final pushing.

dages (ou peaux) ont été conçus de manière à minimiser les fuites d'air. L'espace annulaire a aussi pour fonction de protéger la charpente métallique des actions climatiques (vent, neige, pluie, ...) et de la corrosion en permettant le contrôle du taux d'humidité relative.

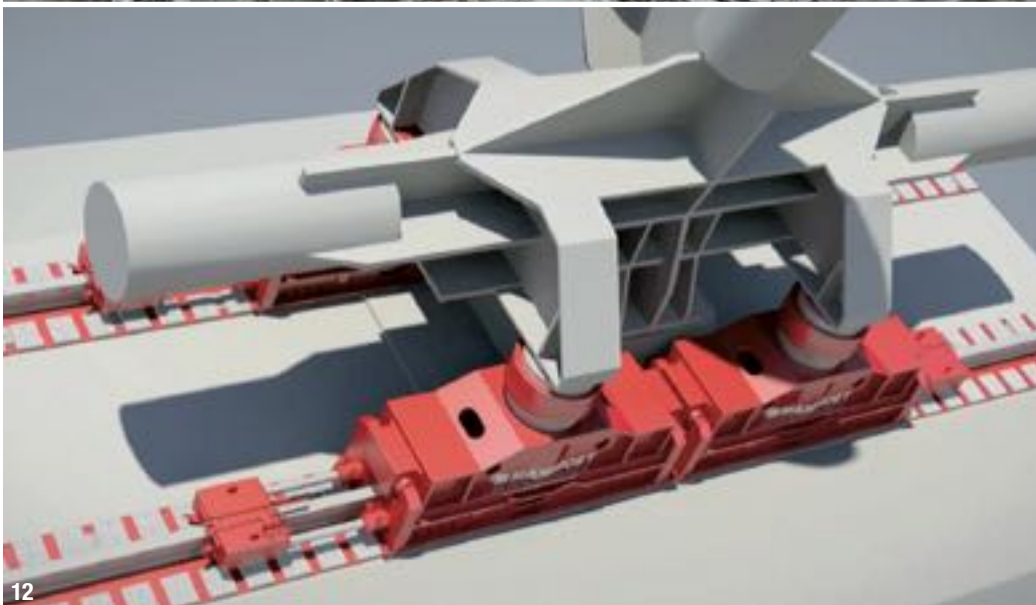
Les critères principaux qui ont gouverné la conception de ces 2 peaux, outre une quasi étanchéité à l'air (débit de fuite limité à 65 l/m²/h) et la tenue aux



10 © EBRD PROJECT MANAGEMENT UNIT



© NOVARKA
11



© NOVARKA
12

radiations (10 rem/h pendant 100 ans), sont les suivants :

Peau extérieure :

- Résistance aux actions climatiques extrêmes (neige, vent, température) et en particulier l'effet d'une tornade de classe 3 pouvant induire une dépression de 1 030 kg/m² ;

→ Isolation thermique.

Peau intérieure :

- Résistance au feu avec une température maximale des gaz de 350°C ;
- Non magnétique pour éviter l'accumulation de poussières radioactives qui aurait pour conséquence de dégrader au fur et à mesure les conditions d'accessibilité sous l'arche pour les phases de démantèlement.

La conception de ce bardage a été basée sur une durabilité de 100 ans minimum sans aucune opération de maintenance programmée. Ce critère de durabilité et celui de la résistance aux radiations ont dicté fortement le choix des matériaux métalliques et non métalliques.

BARDAGE EXTÉRIEUR

Il est constitué d'un bac acier galvanisé peint fixé sur les pannes à l'aide de vis auto-taraudeuses en inox équipées d'une rondelle en EPDM pour des raisons d'étanchéité et également de

11- Vue aérienne de l'arche en position définitive au-dessus du sarcophage.

12- Modèle 3D du système de ripage.

13- Principe de l'espace annulaire.

11- Aerial view of the arch in final position above the sarcophagus.

12- 3D model of the skidding system.

13- Schematic of the annular space.

protection vis-à-vis des phénomènes de corrosion galvanique.

Sur ce bac acier sont posés successivement un premier panneau d'isolant en mousse de polyisocyanurate, une membrane d'étanchéité (air et humidité) en EPDM, un second panneau d'isolant, puis 5 cm d'un isolant type laine de mouton dont le but est d'absorber l'humidité venant de l'extérieur et également de servir d'appuis à la tôle inox extérieure.

La tôle extérieure est en inox 316, d'épaisseur 0,6 mm. Elle est fixée solidement à des attaches en inox également, elles-mêmes fixées à travers

la membrane EPDM sur des profilés "Omega" en acier galvanisé. Ces profilés "Omega" sont fixés sur le bac acier. Toutes les fixations sont assurées avec des vis inox auto perceuses et taraudeuses avec rondelle en EPDM, similaires à celles pour la fixation du bac acier sur les pannes.

BARDAGE INTÉRIEUR

Le bardage intérieur est beaucoup plus simple car sans isolant et non soumis aux actions climatiques. Il est composé également d'un bac acier galvanisé peint de 0,9 mm d'épaisseur, fixé sur les pannes intérieures, et d'une tôle en inox 304 de 0,5 mm d'épaisseur fixée sur le bac acier.

JONCTION AVEC LES BÂTIMENTS EXISTANTS, - MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ

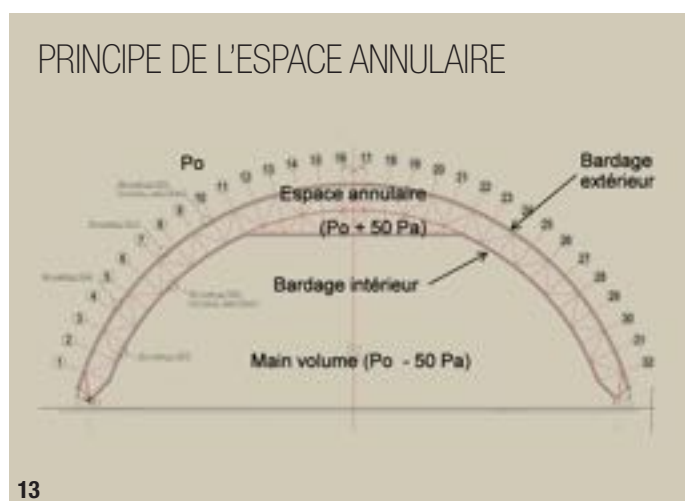
L'étanchéité à l'air au niveau de la jonction des deux murs de l'arche sur les bâtiments existants est assurée par une série de membranes souples, en polyuréthane. Ces membranes, en forme de chevrons, sont fixées d'un côté aux bas des 2 murs métalliques et de l'autre sur les bâtiments existants. Le critère de souplesse est lié à la nécessité de minimiser les efforts amenés sur les bâtiments existants par cette membrane sous l'effet des déplacements de l'arche en pied de mur, pouvant atteindre le mètre pour le mur Est dans le cas exceptionnel de la tornade classe 3.

La conception et la validation de cette membrane ont nécessité de nombreux essais en laboratoire, y compris des essais de vieillissement. Elle est réalisée par projection par un robot sur un moule. Sa géométrie en forme de chevrons permet de limiter les efforts sous des déformations élevées en distorsion (figure 14).

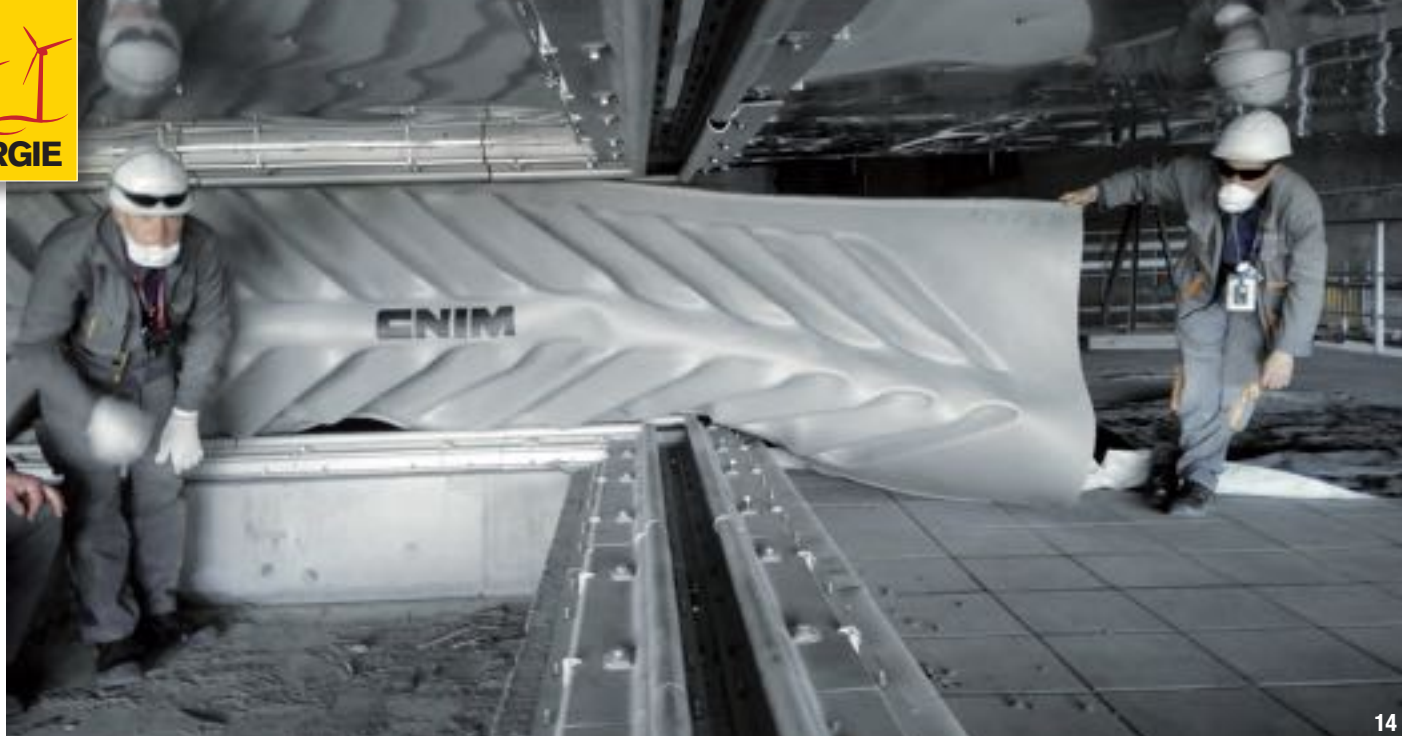
DURABILITÉ DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE

Le principe adopté pour garantir la durabilité sur 100 ans de la structure métallique en acier carbone sans opération de maintenance est de la protéger avec un complexe de peinture anticorrosion pendant les toutes premières années, puis d'empêcher la corrosion par la suite en limitant le taux d'humidité relative dans l'espace annulaire à 40%, grâce à un système de ventilation approprié.

En effet, la corrosion atmosphérique de l'acier est négligeable tant que ce taux d'humidité relative de l'air est plus bas que 40%.



13
© NOVARKA



14

© NOVARKA

Le principe est donc d'assurer en permanence ce faible taux au sein de l'espace annulaire grâce à un système de ventilation le plus économique possible. Ce taux d'humidité relative va varier tout d'abord en fonction de l'humidité de l'air insufflé pour compenser les fuites dans l'espace annulaire, même si elles sont limitées grâce à la conception des peaux intérieures et extérieures les plus étanches possibles à l'air, et en fonction de la température de l'air. La méthode technologique finalement retenue est celle qui consiste à déshu-

14- Installation de la membrane étanche de jonction aux bâtiments existants.

14- Installation of the tight membrane for joining with the existing buildings.

midier l'air insufflé afin de garantir une humidité absolue dans l'espace annulaire suffisamment faible pour garder le taux d'humidité relative inférieur à 40 % même à basse température, sans avoir à chauffer l'air de ce gros volume. Cette déshumidification de l'air entrant

est réalisée à l'aide de roues desséchantes.

Un système de recirculation de l'air de l'espace annulaire est aussi prévu pour déshumidifier encore plus l'air à l'intérieur et ainsi mieux s'affranchir des variations de température. □

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

STRUCTURE MÉTALLIQUE : 25 000 t
POIDS DE L'ARCHE AVEC SES ÉQUIPEMENTS ET BARDAGE (AVANT POUSSAGE) : 36 000 t
FONDATION BÉTON : 20 000 m³, 376 pieux CFA
PIEUX MÉTALLIQUES BATTUS : 396 u, poids acier 4 800 t
BARDAGE EXTÉRIEUR : 87 000 m²
BARDAGE INTÉRIEUR : 67 000 m²
VOLUME ESPACE ANNULAIRE VENTILÉ : 1 000 000 m³
VENTILATION : 4 km de gaines

LES INTERVENANTS

FINANCEMENT : Chernobyl Shelter Fund, abondé de dons internationaux (" les pays donateurs "). Ce fond est géré par la banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD)

MAÎTRE D'OUVRAGE : Centrale Nucléaire de Chernobyl (ChNPP)

MAÎTRE D'ŒUVRE (Project Management Unit) : équipe commune composée de représentants de ChNPP, de Bechtel International Systems

ENTREPRISE (conception - construction) : Novarka, groupement Vinci Construction Grands Projets et Bouygues Travaux Publics

SURETÉ NUCLÉAIRE : Autorité de Sureté Ukrainienne

SOUS TRAITANT STRUCTURE MÉTALLIQUE : Cimolai (Italie)

SOUS TRAITANT SYSTÈME DE POUSSAGE DE L'ARCHE : Mammoet (Pays - Bas)

SOUS TRAITANT BARDAGE : Okyanus (Turquie)

SOUS TRAITANT MEMBRANE ÉTANCHÉITÉ EN PU : CNIM

SOUS TRAITANT CONSTRUCTION DES PONTS ROULANTS : PAR systems (USA)

ABSTRACT

THE CHERNOBYL ARCH: A GIGANTIC CONFINEMENT STRUCTURE

DENIS ÉTIENNE, BOUYGUES TP

The Chernobyl arch is a steel structure of span length 257 metres, 108 metres high and 162 metres long. Its total weight including appurtenances is 36,000 tonnes. Its design and sizing engineering had to take into account the exceptional context of this project, such as the requirement regarding the 100-year lifetime during which no maintenance operation is planned. Numerous tests were needed to qualify and validate the structures and appurtenances, e.g., in particular, the cladding materials and the membrane barrier between the arch and the existing buildings. Built in a healthy area from a radiation exposure viewpoint, the arch is then pushed over more than 300 metres to cover and confine the damaged reactor and its sarcophagus. □

EL ARCA DE CHERNOBYL: UNA ESTRUCTURA GIGANTESCA PARA ASEGURAR EL CONFINAMIENTO

DENIS ÉTIENNE, BOUYGUES TP

El arca de Chernobyl es una estructura metálica de un de 257 m longitud, 108 m de altura y 162 m de anchura. Su peso total incluidos los equipos es de 36.000 t. Su diseño y los estudios de dimensionamiento tuvieron que tener en cuenta el contexto excepcional de este proyecto, como la exigencia de una vida útil de 100 años sin ninguna operación de mantenimiento programada. Se precisaron numerosos ensayos para calificar y validar las estructuras y equipos, en particular los materiales del revestimiento o la membrana de estanqueidad entre el arca y los edificios existentes. Construida en una zona sana en términos de radiación, a continuación el arca se empujó más de 300 m hasta cubrir y confinar el reactor accidentado y su sarcófago. □

VALORISATION DU BIOGAZ À PARTIR DES STOCKAGES DE DÉCHETS : 30 ANS DE PRATIQUE

AUTEURS : PATRICK BASTIDE, RESPONSABLE ACTIVITÉ " DÉCHETS DÉBLAIS MINES ET NUCLÉAIRE ", ARCADIS - THIERRY GISBERT, DIRECTEUR MÉTIER ENVIRONNEMENT, ARCADIS



1
© BASTIDE

DE LA COMPRÉHENSION DE LA FORMATION DES BIOGAZ GÉNÉRÉS PAR LES DÉCHETS DANS LES " INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DÉCHETS NON DANGEREUX (ISDND) " À LEUR UTILISATION EN TANT QU'ÉNERGIE ET LA LIMITATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE, IL AURA FALLU APPRENDRE À MAÎTRISER LES RISQUES LIÉS AUX BIOGAZ, À LES CAPTER PUIS À LES TRAITER AVANT D'ENVISAGER LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE VALORISATION : THERMIQUE, ÉLECTRIQUE, INJECTION EN RÉSEAU DE GAZ.

INTRODUCTION : LA PLACE DU STOCKAGE DANS LA GESTION DES DÉCHETS MÉNAGERS EN FRANCE

Après les dépôts sauvages (les "décharges") que les moins jeunes ont connus, le stockage des ordures ménagères en France, en tant que moyen de traitement officiel, débute de manière réglementairement encadrée dans les années 80. On parle alors de "décharge contrôlée" puis,

1- "Brûlots" sur un ancien site de stockage de déchets ménagers.

1- "Burners" on a former household waste storage facility.

plus tard, de "Centre d'Enfouissement Technique", CET, ou de "Centre de Stockage des Déchets Ultimes", CSDU, et aujourd'hui "d'Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux", ISDND.

C'est à ce jour le moyen de traitement de près de 40% des déchets ménagers que chaque citoyen produit à raison de plus d'un kilogramme par jour : en 2015, 18 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés ont été stockées en France sur les 37,9 millions

de tonnes générées (source : Ademe, chiffres clés 2017).

Le pourcentage de matière organique des déchets ménagers d'un pays est le résultat direct des pratiques et des politiques de gestion des déchets mais également d'aspects sociétaux et culturels.

En France, les déchets ménagers comportent aujourd'hui environ 30% de matière organique et davantage hier, avant la mise en place des techniques de compostage et de tri. ▶

D'un point de vue opérationnel, le mode de traitement moderne en stockage se différencie de la décharge de grand papa par le fait que les déchets sont enfouis sur une épaisseur plus grande et dans des sites confinés. Il s'est agi initialement d'anciennes carrières puis, depuis une trentaine d'années, de sites terrassés et aménagés spécifiquement pour recevoir ces déchets.

Ce mode de traitement, encadré par plusieurs arrêtés ministériels, engendre une fermentation en l'absence d'oxygène, anaérobie, alors que les anciennes décharges, peu épaisses et non recouvertes autorisaient une dégradation plus ou moins aérobie des déchets.

En conséquence, un des produits ultimes de cette dégradation est aujourd'hui le biogaz, partiellement composé de méthane. Il est généré à l'étape de la méthanogenèse (figure 2).

L'arrêté ministériel de décembre 2016 définit, dans son premier article, le biogaz comme étant le "gaz produit par la décomposition des déchets non dangereux stockés dans les casiers".

LA COMPOSITION DU BIOGAZ ET LES RISQUES ASSOCIÉS

Le biogaz natif, tel qu'il est généré au sein d'un massif de déchets, est constitué majoritairement de méthane, CH_4 (50-60%), de dioxyde de carbone, CO_2 (40-50%) et d'azote, N_2 (0-5%). Il contient également quelques composés minoritaires tels que H_2O , CO , H_2S , H_2 et des composés traces comme les COV (Composés Organiques Volatils), les HAP (Hydrocarbures Halogénés Polycycliques) ou d'autres composés soufrés très odorants (thiols, anciennement appelés "mercaptans").

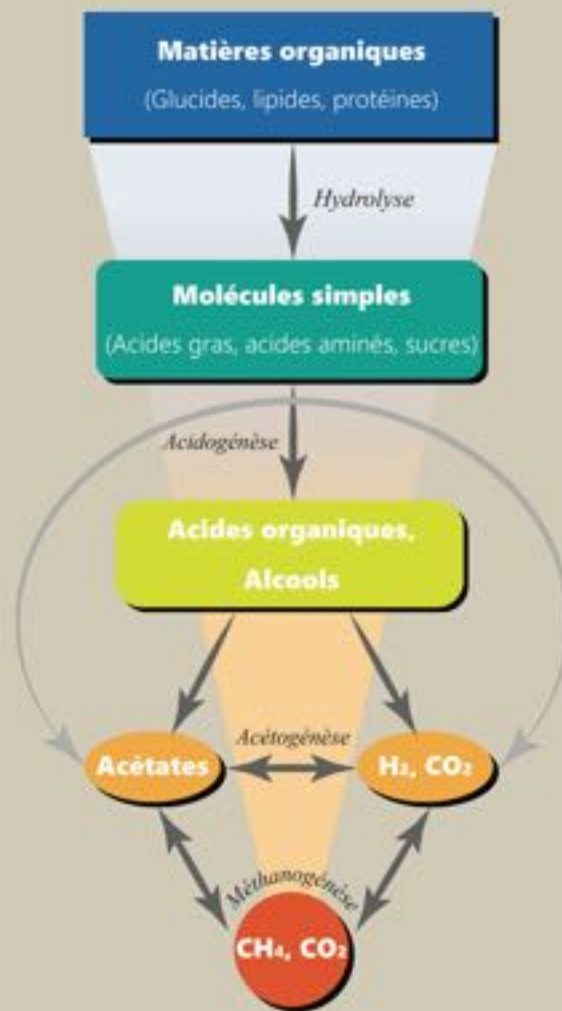
Les proportions de ces composés varient d'un site à l'autre en fonction des déchets stockés (fraction organique, humidité, quantité...) et des conditions de dégradation de la matière organique.

La composition du biogaz varie évidemment au cours du temps, en relation avec les étapes successives de dégradation de la matière organique, pour se stabiliser après quelques mois, dans les conditions standard de notre pays (figure 3).

LES NUISANCES OLFACTIVES, PREMIÈRE PRÉOCCUPATION DES EXPLOITANTS

Dès les années 80, les exploitants des premières installations de stockage de déchets doivent rapidement penser à collecter puis à brûler le biogaz, pour lutter contre les émissions d'odeurs

PROCESSUS DE BIODÉGRADATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE FERMENTESCIBLE



2

© ARCADIS

très désagréables dues aux composés en trace.

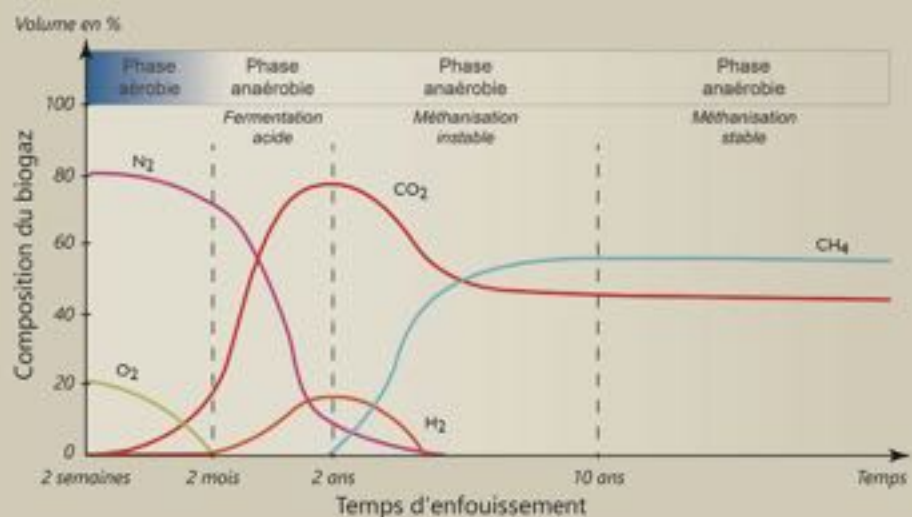
Les sites étant déjà souvent équipés de puits servant au pompage des lixiviats de déchets, les exploitants installent dans un premier temps, des brûlots sur le sommet de ces puits, afin de canaliser le biogaz et d'y mettre le feu (figure 1).

2- Processus de biodégradation de la matière organique fermentescible.

3- Évolution théorique de la composition du biogaz (composés majeurs) dans une installation de stockage des déchets ménagers en France.

2- Process of biodegradation of fermentable organic matter.
3- Theoretical change in the composition of biogas (major compounds) in a household waste storage facility in France.

ÉVOLUTION THÉORIQUE DE LA COMPOSITION DU BIOGAZ (COMPOSÉS MAJEURS) DANS UNE INSTALLATION DE STOCKAGE DES DÉCHETS MÉNAGERS EN FRANCE



3

© ARCADIS



4

© BASTIDE

4- Tête de puits et réseau de captage du biogaz sur un site en exploitation.

5- Conditions d'explosivité d'un mélange méthane / oxygène.

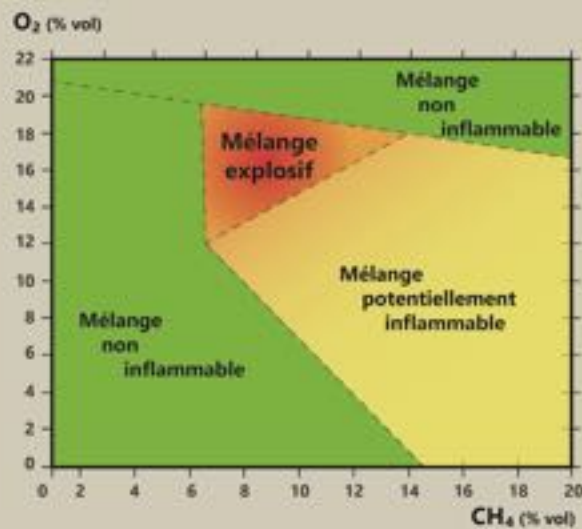
6- Photo historique de la première explosion liée à la migration du biogaz, recensée en France ; habitation voisine d'un stockage de déchets - début des années 1990.

4- Shaft head and biogas capture network on a facility in service.

5- Conditions of explosiveness of a methane/oxygen mixture.

6- Historic photo of the first explosion due to the migration of biogas identified in France; dwelling close to a waste storage facility - early 1990s.

CONDITIONS D'EXPLOSIVITÉ D'UN MÉLANGE MÉTHANE / OXYGÈNE



5

© ARCADIS



6

© FD CONSEIL

DÉCOUVERTE ET PRISE EN COMPTE DES RISQUES D'EXPLOSION

Au début des années 90, les pratiques et les réglementations évoluant rapidement, les conditions d'exploitation des stockages de déchets sont modifiées afin de rechercher une meilleure efficacité du compactage des déchets et la limitation des envols et des odeurs via la réalisation de couches de couverture en terre végétale sur les déchets.

On commence, à cette époque, à soustraire activement le gaz à l'aide d'un réseau de collecte reliant des puits mis en dépression relative.

En conséquence, le biogaz circulant dans ces réseaux de captage et de transport est dilué par de l'air provenant de l'environnement du massif de déchets, en proportion variable selon le niveau d'étanchéité de la couverture des déchets, le réglage de la dépression du réseau, l'étanchéité des collecteurs et les conditions d'exploitation (figure 4).

Il en résulte un apport d'oxygène dans le biogaz transporté alors que ce composé est initialement quasi absent du biogaz natif.

Dans le même temps, les exploitants vérifient, à leurs dépens, qu'une concentration en méthane qui s'abaisse entre 5 et 15 % dans l'air constitue un mélange potentiellement explosif (figure 5), sur une installation de stockage de déchets comme à proximité de celle-ci.



7a

© GISBERT & BASTIDE

La première explosion accidentelle dans une maison trop proche d'une ancienne décharge est recensée en Alsace (figure 6) : le biogaz avait migré sous la chaussée et les terrains superficiels en raison d'une période de gel, jusqu'à atteindre la cave de la maison. Un coup de sonnette déclenche l'accident.

Le captage du biogaz fera ensuite l'objet d'une attention soutenue.

PRISE EN COMPTE DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

Une fois les risques de nuisances olfactives et d'explosions compris et pris en compte, le biogaz commence, dès les années 90, à être valorisé en tant que ressource énergétique.

Pour autant il faudra attendre le changement de millénaire et la prise en compte des enjeux liés au changement climatique pour que les techniques de captage du biogaz visent à limiter au maximum les émissions diffuses vers l'atmosphère. Il faut dire que la taxation de ces émissions est instaurée, comme la mise en place du dispositif de "Crédits de Carbone" pour les projets "vertueux" situés dans les pays bénéficiaires de ce mécanisme né du protocole de Kyoto.

Selon les époques et les modélisations, une tonne de méthane émise à l'atmosphère est considérée équivalente, en termes d'impact sur le changement climatique, à 21 à 48 t de CO₂.

Ceci va évidemment constituer une incitation sérieuse à des captages de plus en plus performants.

PRISE EN COMPTE DES RISQUES SANITAIRES

Enfin, en 2007, la méthodologie française de gestion des sites et sols pollués évolue et les études quantitatives des risques sanitaires (EQRS) deviennent un outil standard pour définir si un site donné génère ou non un risque sanitaire admissible pour les usagers ou les riverains de ce site.

Dans cet esprit, et bien que les ISDND ne soient pas assujetties à cette régle-

7a & 7b- Forages verticaux à la tarière 600 mm, dans les déchets.

7a & 7b- 600 mm vertical auger drill holes in wastes.

mentation, on commence à réaliser ces études de risques, notamment dans le cas des sites orphelins.

Il convient dès lors de considérer, non seulement les composés minoritaires du biogaz connus pour leur toxicité tels que H₂S, mais aussi de nombreux composés traces potentiellement à risque pour l'espèce humaine. La performance attendue des réseaux de collecte et des moyens de traitement du biogaz s'en trouve accrue.



7b

© GISBERT & BASTIDE



© BASTIDE & JULIEN
8a

DE L'ÉLIMINATION D'UN DÉCHET VERS LA VALORISATION D'UNE RESSOURCE ÉNERGÉTIQUE

Le captage du biogaz sur les ISDND a été rendu obligatoire par l'Arrêté Ministériel de 1997 qui impose que le biogaz soit capté de manière optimale et transporté, de préférence, vers une installation de valorisation ou, à défaut, d'élimination. Un casier de stockage de déchets doit, dès lors, être équipé d'un

**8- Forages
verticaux au
carottier dans
les déchets.**

**8- Vertical
core drill holes
in wastes.**

système de dégazage au plus tard un an après son comblement.

Tous les arrêtés ministériels suivants ont durci cet article pour imposer aujourd'hui le captage du biogaz dès sa production (AM2016-article 12) et l'orientation du biogaz capté prioritairement vers un dispositif de valorisation.

CAPTAGE DU BIOGAZ

En France le captage du biogaz est réalisé principalement suivant deux

techniques : le captage vertical et le captage subhorizontal.

Le captage vertical : il consiste en la foration de puits au cœur du massif de déchets, sur environ 75 % de sa hauteur. Pour réaliser ces forages particuliers, on utilise principalement, une tarière hélicoïdale de 600 mm de diamètre (figure 7) ou un carottier simple enveloppe de diamètre allant de 600 mm à 1200 mm (figure 8).

En règle générale, on considère que le rayon d'action (d'aspiration) d'un puits foré est d'environ 25 m.

La densité de puits sur une installation de stockage sera donc de 5 puits/ha. Chaque forage est équipé d'une sonde en Polyéthylène Haute Densité (PeHD) fentée et d'un massif drainant permettant l'aspiration du biogaz.

Le captage subhorizontal : il consiste à réaliser des tranchées drainantes permettant de capter le biogaz au fur et à mesure de l'avancement du remplissage du casier par les déchets (figure 9). Chaque tranchée est constituée d'un lit de matériaux drainants et d'une sonde PeHD fentée permettant l'aspiration du biogaz.

L'ensemble des puits verticaux et des tranchées est raccordé au réseau de captage permettant le transport du biogaz vers une plateforme de valorisation ou l'équipement d'élimination (torchère).

Ce réseau de transport est constitué d'un ensemble de tubes en PeHD soudés entre eux et étanches vis-à-vis de l'atmosphère, d'un diamètre suffisant pour permettre au flux de biogaz aspiré par le système de traitement (valorisation ou élimination) de circuler, malgré les pertes de charge engendrées par la construction du réseau (figure 10). La pression interne reste donc relativement constante.

Le réseau de transport est équipé de tous les organes de gestion nécessaires, vannes, compensateur de dilatation, guides, rails de pose...

BRÛLAGE => DU BRÛLOT À LA TORCHÈRE ACTUELLE

Les premiers équipements mis en place pour détruire le biogaz n'étaient que de simples cheminées permettant de contrôler la combustion du biogaz qui était volontairement enflammé. Chaque puits avait son brûlot (figure 1).

Ensuite vinrent les premières torchères à combustion contrôlée permettant une maîtrise du dégazage car dotées d'un surpresseur aspirant le biogaz au travers des réseaux de transport (figure 11).



© BASTIDE & JULIEN
8b

Ces trochères en constante évolution peuvent être aujourd'hui contrôlées à distance et détruire des biogaz présentant de très faibles concentrations en méthane (< 15% vol de CH₄) sur des gammes de débit allant de 50 à 2000 Nm³/h (figure 12).

VALORISATION DU BIOGAZ

La réglementation, la prise en compte de l'environnement et l'opinion publique poussant les exploitants à valoriser le biogaz capté, l'utilisation du biogaz en tant qu'énergie est apparue comme une évidence. Ainsi le biogaz a successivement été utilisé pour produire de la chaleur sur le site de stockage ou en dehors, de l'électricité, des carburants ou être injecté dans les réseaux de distribution de gaz. Toutefois toutes ces méthodes de valorisation se heurtent à la nature même du biogaz, déchet de déchets. Ainsi la composition du biogaz et notamment ses teneurs en eau (gaz saturé) et en H₂S sont les principaux obstacles à la valorisation du biogaz, obstacles qu'il faudra donc traiter.

Utilisation du biogaz par une entreprise extérieure :

Dans certaines conditions et sous condition de traitement, le biogaz peut être transporté vers une installation de type chaudière d'un industriel implanté à proximité d'une ISDND. Le biogaz doit toutefois être d'une qualité permettant le fonctionnement de la chaudière.



9 © BASTIDE

À titre d'exemple, le biogaz issu d'une ISDND alimente les chaudières d'une briqueterie, grande consommatrice de gaz naturel, accolée au site. Cette valorisation a permis d'éviter la consommation de plus de 2,5 millions de m³ par an de gaz naturel par la briqueterie.

Utilisation du biogaz pour produire de l'électricité :

Ce type de valorisation est de loin le plus utilisé car il a été promu par les gouvernements successifs, via des tarifs de rachat de l'électricité avantageux. Il consiste à utiliser le pouvoir calorifique du méthane contenu dans le biogaz pour alimenter un moteur thermique accolé à un générateur et

à un transformateur, pour atteindre les 20 000 volts requis pour une injection dans le réseau de distribution ERDF. À titre d'exemple, l'ISDND de La Malespine, à Gardanne (13), exploité par la Semag est équipé d'une plateforme de valorisation de biogaz produisant actuellement une puissance électrique nette moyenne d'environ 550 à 650 kW pour un tonnage annuel de déchets de l'ordre de 50 000 t dont 60 % de déchets fermentescibles (figure 13).

Utilisation du biogaz comme énergie pour le traitement des lixiviats :

Dans ce cas, l'utilisation de la chaleur produite par le brûlage du biogaz est utilisée pour évaporer les lixiviats ("jus de décharge"), afin d'obtenir une phase concentrée en particules polluantes se présentant sous forme de boues.

Production de biocarburant GNV (Gaz Naturel Véhicules) :

Ce mode de valorisation est en cours de développement en France après des années de test, dès 1995, en Touraine puis à Lille. A contrario, ce procédé de valorisation est très développé dans les pays nordiques (Suède en particulier).

Injection de biogaz dans le réseau de distribution du gaz naturel :

En France, malgré la loi 2003-8 du 3 janvier 2003 donnant la possibilité d'injecter "de manière sûre" du biogaz dans un réseau de gaz naturel,

9- Tranchée drainante partiellement équipée.

10- Réseau de transport du biogaz vers la plateforme de valorisation à l'arrière-plan.

9- Partially equipped drainage trench.

10- Network for biogas transport to the recovery platform in the background.



10

© BASTIDE- SEMAG



11- Torchère simple fût avec surpresseur et réseau biogaz - 2007.

12- Torchère double fût - 2008.

13- Plateforme de valorisation et réseau de captage biogaz - 2018.

11- Single-barrel flare with booster and biogas network - 2007.

12- Double-barrel flare - 2008.

13- Biogas recovery platform and capture network - 2018.

le développement de ce mode de valorisation est très récent. Celui-ci consiste en l'épuration du biogaz à l'aide de procédés multiples (filtration membranaire, distillation, etc.) afin d'obtenir un bio-

gaz contenant un minimum de 97 % de méthane (CH₄), appelé biométhane. Après une odorisation de ce biométhane et une compression à une pression légèrement supérieure à la



pression de service des réseaux de gaz naturel, le biogaz est réinjecté et se mélange totalement au gaz naturel. L'objectif du ministère de l'Écologie est d'atteindre 10 % de biométhane dans les réseaux de gaz naturel d'ici à 2030.

CONCLUSION - D'UN DÉCHET NUISIBLE À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Le gaz que nous consommons en France est presque exclusivement importé.

Dès lors, produire du gaz sur le territoire français permet de diminuer d'autant notre déficit commercial.

Si l'on considère que le biogaz peut maintenant être utilisé aussi efficacement que le gaz naturel, les projets correspondants sont autant de solutions pour combattre le réchauffement climatique.

La loi de transition énergétique prévoit que 10 % de gaz "renouvelable" soit intégré à la consommation française d'ici 2030 mais les acteurs de la filière, plus optimistes, espèrent que cette valeur sera plus proche de 30 %. Cet objectif correspond à 500 à 1400 sites injectant du biométhane dans le réseau français.

Une étude de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), souligne que la quantité de déchets (ménagers et agricoles confondus) générés en France serait suffisante pour, qu'en 2050, le réseau national de gaz soit alimenté exclusivement de biométhane.

Le marché de la valorisation du biogaz a donc de beaux jours devant lui, notamment à partir des stockages de déchets de notre territoire, puisque la production de biogaz continue plusieurs décennies après la fin du remplissage du site. □

ABSTRACT

BIOGAS RECOVERY FROM WASTE STORAGE UNITS: 30 YEARS' EXPERIENCE

PATRICK BASTIDE, ARCADIS - THIERRY GISBERT, ARCADIS

The formation of biogas from wastes buried in household and similar waste storage facilities began to be discovered in the 1980s, with the creation of the first thick, compacted and covered facilities. Nowadays, on non-hazardous waste storage facilities, this biogas is used as an energy and its capture is optimised, making it possible to limit greenhouse gas emissions and control health risks. But it was necessary to learn how to control the risks related to biogas, particularly risks of fire and explosion, to capture it and then treat and purify it, before considering the various recovery techniques: thermal, electric, or injection into the gas network. □

APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS A PARTIR DE ALMACENES DE RESIDUOS: 30 AÑOS DE PRÁCTICA

PATRICK BASTIDE, ARCADIS - THIERRY GISBERT, ARCADIS

El descubrimiento de la formación del biogás a partir de los residuos enterrados en las zonas de almacenamiento de residuos domésticos y similares empieza en los años 80 con la creación de los primeros depósitos espesos, compactados y recubiertos. Actualmente, en las instalaciones de almacenamiento de residuos no peligrosos, este biogás se utiliza como energía y se optimiza su captación, lo que permite limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y controlar los riesgos sanitarios. Pero fue preciso aprender a controlar los riesgos relacionados con el biogás, principalmente de incendio y explosión, a captarlo y seguidamente a tratarlo y depurarlo, antes de plantear las diferentes técnicas de aprovechamiento: térmico, eléctrico, inyección en la red de gas. □



1
© N. THOUVENIN

LE GÉNIE CIVIL AU SERVICE DE LA SÛRETÉ DES CENTRALES NUCLÉAIRES - LES DIESELS D'ULTIME SECOURS (DUS)

AUTEURS : FARID MERABET, DIRECTEUR, LÉON GROSSE NUCLÉAIRE - MARION BONNET, DIRECTRICE DE PROJET DUS, LÉON GROSSE NUCLÉAIRE - PIERRE CHARLES, RESPONSABLE PRODUCTION SITE DE CHINON, LÉON GROSSE NUCLÉAIRE - PIERRE DEVLAMYNCK, RESPONSABLE PRODUCTION SITE DE GRAVELINES, LÉON GROSSE NUCLÉAIRE - BENOIT PHILIPPE, RESPONSABLE PRODUCTION SITE DE DAMPIERRE, LÉON GROSSE NUCLÉAIRE

LE 11 MARS 2011, LES AGRESSIONS NATURELLES EXTRÊMES SURVENUES SUR LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE FUKUSHIMA AU JAPON ONT CONDUIT À UNE ÉVALUATION COMPLÉMENTAIRE DE SÛRETÉ (ECS) DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES EUROPÉENNES. EN FRANCE, LES ECS ONT ÉLARGI LE PÉRIMÈTRE POUR COUVRIR L'ENSEMBLE DES 79 INSTALLATIONS NUCLÉAIRES JUGÉES PRIORITAIRES PAR L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (ASN). C'EST DANS CE CONTEXTE QUE L'ASN A DÉPLOYÉ UN PROGRAMME D'ACTIONS DESTINÉES À ACCROÎTRE LE NIVEAU DE RÉSISTANCE DES CENTRALES NUCLÉAIRES FRANÇAISES AUX AGRESSIONS NATURELLES EXTRÊMES. LES BÂTIMENTS DUS FONT PARTIE DE CE DISPOSITIF (figure 1).

L'étude menée par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) pour répondre aux demandes de l'ASN a abouti à développer et déployer le concept de "noyau dur" (figure 2) sur l'ensemble des centrales du territoire. Les Diesels Ultimes Secours (DUS) s'inscrivent dans ce cadre. Chacun des 58 réacteurs du parc français sera équipé d'ici 2020 d'un bâtiment forteresse abritant un moteur diesel, dit "d'ultime" secours, de 3,5 MW alimenté au fuel. Le moteur dispose d'une autonomie de fonctionnement de quinze jours sans maintenance, constituant ainsi une redondance complémentaire en matière d'alimentation électrique de secours.

En cas de perte totale des alimentations électriques de secours déjà existantes, les DUS permettront de maintenir une source électrique disponible et nécessaire aux systèmes de refroidissement du cœur du réacteur. Les bâtiments DUS sont dimensionnés par la Division de l'Ingénierie du Parc, de la Déconstruction et de l'Environnement (DIPDE) d'Electricité de France (EDF) pour résister aux agressions naturelles extrêmes.

UNE ORGANISATION SPÉCIFIQUE AU PROJET

Les travaux de Génie Civil des DUS, répartis sur les 18 centrales du parc nucléaire français, ont été segmentés

1- Bâtiments DUS du CNPE de Gravelines.

1- EDGS buildings of the Gravelines NPP.

en quatre lots. Léon Grosse Nucléaire est titulaire d'un lot comprenant la construction de 20 bâtiments répartis sur 5 Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE) différents : Cattenom dit la "tête de série", Chinon, Dampierre, Gravelines et Chooz. Le projet, démarré en 2016, a nécessité une forte mobilisation de l'entreprise et

la création d'une agence dédiée nommée "Léon Grosse Nucléaire" (LGN). LGN s'est appuyé sur les agences Léon Grosse de Rouen, Amiens, Lyon, Dijon, et Travaux Publics pour réaliser les travaux. La construction exigeante des ouvrages de Génie Civil est à réaliser sur 5 centrales en simultané dans un délai global initial de 10 à 12 mois. Ce projet a mobilisé jusqu'à 300 collaborateurs Léon Grosse (compagnons et encadrants) lors du pic de charge du projet en 2017.

DESCRIPTION DU PROJET

Les DUS sont des bâtiments "bunker" de 25 m de haut avec leur structure en charpente métallique, 24 m de long et

INFOGRAPHIE DU CONCEPT DU NOYAU DUR IRSN

Le noyau dur, un dispositif de sûreté ultime pour résister aux situations extrêmes

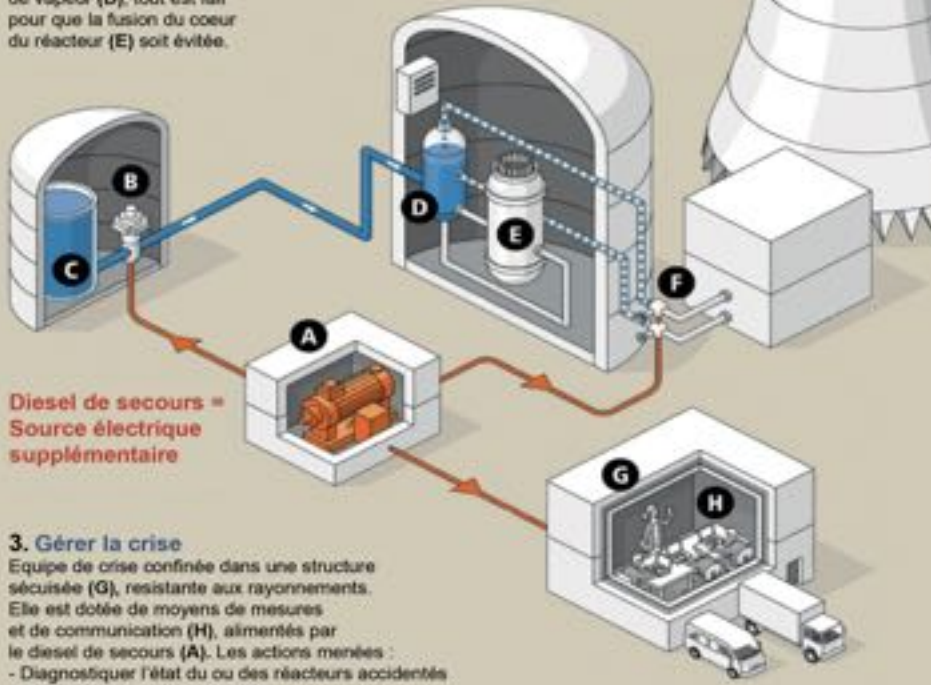
En cas d'accident, le noyau dur doit assurer de manière durable les fonctions de sûreté vitales, en cas de perte totale des sources froides ou de l'alimentation électrique, à la suite d'une agression hors norme.

1. Stopper la réaction nucléaire et assurer le refroidissement

Le diesel de secours (A) alimente une pompe (B) reliée à une réserve d'eau (C) situées dans un bâtiment adjoint. En continuant de fournir de l'eau au générateur de vapeur (D), tout est fait pour que la fusion du cœur du réacteur (E) soit évitée.

2. Maîtriser le confinement pour limiter les rejets

Fermeture des vannes d'isolement des circuits sortant de l'enceinte (F) alimentées par le diesel de secours (A). Recombinaison passive de l'hydrogène produit en cas de dégradation du cœur afin de limiter le risque d'explosion. Injection de soude dans les piscines pour limiter les rejets d'iodes radioactifs.



Diesel de secours = Source électrique supplémentaire

3. Gérer la crise

Equipe de crise confinée dans une structure sécurisée (G), résistante aux rayonnements. Elle est dotée de moyens de mesures et de communication (H), alimentés par le diesel de secours (A). Les actions menées :

- Diagnostiquer l'état du ou des réacteurs accidentés et pronostiquer leurs évolutions
- Evaluer les rejets radioactifs et leurs conséquences (mesures de radioactivité dans l'environnement et météorologiques)
- Communiquer avec les pouvoirs publics pour mettre en oeuvre, si nécessaire, des actions de protection des populations.

2- Infographie du Concept du noyau dur IRSN.

3- Maquette numérique des DUS.

2- IRSN digital images of the hard core concept.

3- Computer model of EDGS's.

12 m de large, composés d'un RDC, de deux niveaux et d'une terrasse technique. L'ensemble de la structure est dimensionné pour recevoir le processus lié au groupe électrogène. Chaque niveau comprend des locaux multiples (14 au total) qui assurent, par les systèmes électromécaniques en place, l'autonomie en combustible et le fonctionnement du moteur diesel (figure 3). Le lot génie civil comprend les travaux de terrassement, gros œuvre, serrurerie, menuiserie, étanchéité, peinture et charpente métallique, réalisés en partie en co-activité avec les lots VRD et électromécanique.

De géométrie similaire, les 20 bâtiments DUS ne sont pas rigoureusement identiques. L'industrialisation de leur construction à partir du retour d'expérience de la tête de série n'est donc pas automatique. À titre d'exemple, les paliers 1300 MW (Cattenom) et 900 MW/N4 ont des fournisseurs différents pour le lot électromécanique. La configuration des bâtiments est également variable suivant le type d'orientation (standard ou miroir) ou de fondations (sur radier ou sur appuis parasismiques).

Malgré ces singularités, chaque bâtiment DUS répond aux mêmes exigences de dimensionnement afin de garantir la résistance de l'installation notamment aux phénomènes suivants :

- Le séisme "Noyau Dur" (SND), plus pénalisant que le Séisme Majoré de Sécurité (SMS) ;
- Une tornade caractérisée notamment par des vents extrêmes, des niveaux de dépression extrêmes et des projectiles associés ;
- Les inondations externes causées par la remontée de la nappe phréatique ou par des pluies de forte intensité cumulées à des phénomènes de vents et de grêle ;
- L'explosion externe ou interne.

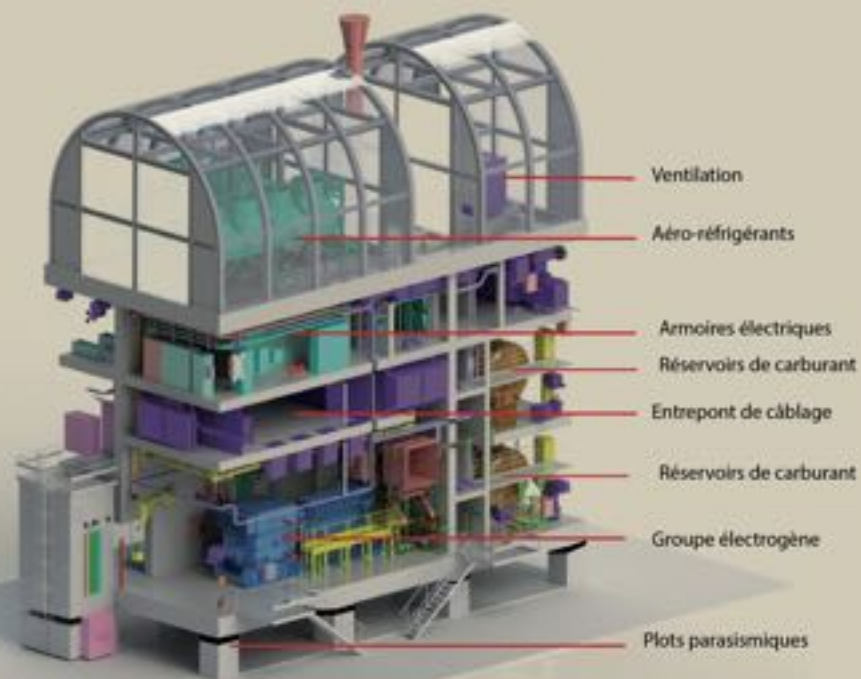
L'ENVIRONNEMENT DU PROJET

La spécificité du génie civil des DUS réside dans le niveau d'exigence élevé inhérent à la sûreté nucléaire. Les tolérances et le suivi de réalisation sont strictes, et les niveaux de contrôles très poussés.

© HERVE BOUILLY - SOURCE : IRSN

2

MAQUETTE NUMÉRIQUE DES DUS



© BET CLEMESSY

3



4 © PHOTOHÉRIQUE LGN

Bien que les bâtiments soient réalisés sur des zones foncières propres aux CNPE mais en dehors du cœur de l'exploitation, Léon Grosse est confronté aux spécifications d'intervention propres à chacune des centrales. Les collaborateurs de l'entreprise, les sous-traitants et les fournisseurs sont donc soumis aux formalités d'accès de chaque CNPE : anticipation d'un mois pour le personnel intervenant pour la première fois sur chaque centrale, accès des véhicules et transporteurs soumis à une procédure stricte et anticipée de 72h à minima. Le suivi de ces accès et leur renouvellement périodique participe à la complexité de ce projet pour lequel la gestion des flux de personnel, de fournitures et d'engins requiert une grande maîtrise de la planification.

L'assurance qualité sur un site nucléaire en exploitation est cadrée par la note EDF NT 85-114 Ind. 17 qui définit les exigences relatives à l'habilitation du personnel, à la préparation de l'intervention, aux documents de suivi de la réalisation des travaux et au traitement des non-conformités. À ce titre, chaque intervenant doit disposer d'une habilitation de niveau attestant de ses compétences techniques et de ses connaissances en termes d'assurance qualité, dès lors qu'il exécute une activité (niveau HN1) ou qu'il réalise des contrôles techniques (niveau HN2). Avant chaque activité, une vérification

complémentaire est effectuée par le Maître d'Œuvre EDF lors d'une réunion dite de "levée des préalables", permettant de vérifier les habilitations du personnel intervenant et la conformité des procédures sur les plans sécurité, qualité et méthode. Les documents nécessaires à la réalisation d'une activité sont regroupés dans un Dossier de Réalisation de Travaux (DRT), comprenant notamment une liste de documents applicables, le document de suivi de l'intervention, les PV de contrôles et les fiches de non-conformité. Ce dossier constitue la véritable

4- Coulage du radier inférieur tranche 3 du DUS 3 sur le CNPE de Dampierre.

5- Appareil d'appui en élastomère fretté avec platines d'encastrement.

4- Pouring the lower foundation raft of phase 3 of EDGS 3 at the Dampierre NPP.

5- Elastomer support device reinforced with flush mounting panels.

"mémoire" du déroulement de l'activité et des différents acteurs impliqués dans sa réalisation.

LA RÉALISATION DES OUVRAGES

LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Sur les projets de génie civil industriel, les études d'exécution (plans d'armatures, plans de charpente) sont souvent réalisées par le maître d'œuvre dès la conception. À ce titre, la maîtrise d'œuvre fournit des plans guides ou des plans d'exécution. Les méthodes de réalisation définies en phase de



5 © PHOTOHÉRIQUE LGN

conception font l'objet d'optimisations par l'entreprise (arrêts et reprises de bétonnage notamment) et validées par la maîtrise d'œuvre.

LES FONDATIONS

Les DUS sont fondés sur radier. Toutefois, préalablement aux travaux de génie civil, EDF a effectué une campagne de confortement de terrain pour assurer la stabilité du sol sous radier. À Gravelines par exemple, les sols fins sableux du site, liquéfiables sous sollicitations transversales de type séisme, ont nécessité un traitement de sol particulier par injection de ciment : 2500 t de ciment ont ainsi été injectées à 16 m de profondeur sur un volume de terrain de 19500 m³ pour les 6 DUS.

6- Levée de voile au-dessus des appuis parasismique sur les DUS 3 et 4 du CNPE de Dampierre.

7- Élévation des DUS en cours de réalisation sur le CNPE de Chooz.

6- Lifting a shell above the earthquake-resistant supports on EDGS 3 and 4 of the Dampierre NPP.

7- Raising EDGS's during execution at the Chooz NPP.

RADIER INFÉRIEUR

Les radiers inférieurs assoient les importantes descentes de charge de la structure propre et de l'ensemble des équipements.

Selon l'activité sismique des zones d'implantation des DUS, certains sont équipés de 8 appuis parasismiques situés entre deux radiers (inférieur = 1,40 m d'épaisseur, supérieur = 1,00 m d'épaisseur). Les sites de Gravelines, Chinon et Dampierre sont concernés par cette configuration, soit 14 des 20 DUS à réaliser. Le radier principal, dit inférieur, représente un volume de 405 m³ de béton et est ferrailé à 220 kg/m³. Il est coulé en continu sur une durée moyenne de 15 heures. L'assemblage des

armatures, étape clé de la réussite de l'opération, est à 3 niveaux de contrôles (Interne, Externe et Extérieur). D'autant que de nombreuses platines sont insérées dans la structure de ce radier notamment pour les sites de Chooz et Cattenom. Le court délai des travaux a conduit à couler du béton sur toutes les périodes de l'année. Des procédures de bétonnage par temps froid et chaud ont ainsi été mises au point avec les équipes d'EDF (figure 4).

APPUIS PARASISMIQUES ET RADIER SUPÉRIEUR

L'appui parasismique est constitué d'un plot en béton armé dans lequel est encastré l'appareil en élastomère fretté. La dimension des appuis est de 1,18 m x 1,18 m pour une hauteur de 0,538 m. Leur masse est de 3,1 t et les plaques de scellement comprennent 36 goujons Nelson chacune (figure 5). L'étude et la fabrication, compte tenu de la dimension exceptionnelle du dispositif et de sa fonction, ont fait l'objet d'une conception spéciale.

Les plots d'appui en béton ont une dimension de 1,50 m x 1,50 m x 1,20 m ht. Le bétonnage est effectué en 3 phases. Une première phase de 0,90 m, une seconde de 0,26 m puis une phase de scellement final de 0,03 m.

La redondance de ces ouvrages sur les DUS (14 des 20 DUS) et la précision d'exécution requise ont mené à l'élaboration d'une procédure spécifique afin d'uniformiser le processus de réalisation et d'assurer une parfaite qualité d'exécution. Cette procédure est basée sur des essais de convenance réalisés sur chantier et améliorée avec le retour d'expérience des différents sites. Les différentes mises au point des méthodes d'exécution ont permis de concevoir des outils coffrants spécifiques pour optimiser le délai de réalisation. Ces outils, équipés de vérins de réglage, permettent d'ajuster la planimétrie. Les deux couches de mortier de scellement peuvent alors être réalisées tout en conservant un réglage de l'appui dans les trois directions.

La précision de réalisation est primordiale pour ne pas créer des dénivellées d'appuis qui apporteraient des contraintes au radier supérieur entièrement appuyé sur ces 8 points. Le radier supérieur de 1,00 m d'épaisseur est coffré sur étalement entre ces appareils d'appuis. L'ensemble du génie civil du bâtiment est par la suite réalisé en suspens à partir de la plateforme de travail (figure 6).



© PHOTOTHÈQUE LGN
6



© PHOTOTHÈQUE LGN
7

LES VOILES

La cellule méthodes de Léon Grosse Nucléaire a opté pour une réalisation des voiles de 14,94 m de hauteur (y compris acrotères) en deux levées de 10,50 m et 4,44 m. Cette solution a contraint à utiliser des banches de grande hauteur mais a permis d'optimiser le nombre de coulages. Aussi, la mise en place de plateformes de travail en extérieur a été réduite, tout comme les risques d'erreur sur l'assemblage des armatures en limitant les reprises. La première levée a été décomposée en 13 rotations afin d'optimiser les outils de coffrage, les conditions de circulation, le ferrailage, les volumes de chaque plot (figure 7).

Chaque semaine, selon leur dimension et la complexité de ferrailage/inserts, entre un et deux voiles peuvent être coulés. Après définition des emplacements des cheminées de coulage, les différentes longueurs de goulotte sont mises en place avant fermeture de la deuxième peau de coffrage. Ces goulottes permettent de réduire la hauteur de chute du béton et d'éviter ainsi les risques de ségrégation. Lors du bétonnage, la pompe à béton se raccorde sur les différents tubes afin de répartir de manière homogène le béton dans le coffrage. À l'avancement du coulage (durée totale d'environ 4 h pour 30 m³), les cheminées de bétonnage sont retirées à la grue.

Les rotations des voiles ont aussi été pensées afin de limiter les charges sur les appuis parasismiques.

Une levée représente entre 40 et 60 m³ de béton, soit entre 100 et 150 t d'acier et de béton. En phase provisoire, des palées sont installées à proximité des appuis néoprènes pour ne pas les solliciter durant la réalisation des voiles (figure 8).

Avant chaque coulage, de nombreux contrôles (armatures et coffrages) sont effectués afin de s'assurer de la conformité aux plans. Le béton est également contrôlé durant sa mise en place (température, affaissement, air occlus, contrôle des bons de pesée, courbes wattmètre, respect de la rhéologie du béton, prélèvements d'éprouvettes (une série tous les 100 m³ et par bétonnage)). Ces contrôles permettent de s'assurer que le béton mis en place répond à la formulation agréée par EDF. En cas de non-conformité d'un des contrôles, la livraison du béton est refusée. Une attention particulière est également apportée sur le respect des temps de cure du béton. Le décoffrage peut se faire une fois la résistance de



8 © PHOTOTHÈQUE LGN

14 MPa atteinte, soit entre 48 h et 72 h après bétonnage. L'ensemble de ces points est consigné dans les Documents de Suivi de l'Intervention (DSI).

LES ARMATURES

De par leur rôle dans le maintien de la sûreté des installations nucléaires et la nécessité de leur résistance aux agressions extérieures, les DUS ont été

ferrailés selon des ratios largement supérieurs aux bâtiments d'usage industriel classique : 220 kg/m³ pour les radiers et dalles, et 180 kg/m³ pour les voiles. La mise en place d'une telle quantité d'acier a poussé l'entreprise à adapter ses modes constructifs afin d'assurer une bonne mise en œuvre du béton (cheminée de coulage, cheminée de vibration, dispositions construc-

8- Palée provisoire sous radier supérieur et aux droits des systèmes d'appui parasismiques.

9- Banche préparée avec inserts positionnés sur le CNPE de Chinon.

10- Vue des platines du local transformateur du DUS 3 sur le CNPE de Cattenom.

8- Temporary bent under upper foundation raft and at the level of the support systems.

9- Formwork panel prepared with inserts positioned at the Chinon NPP.

10- View of the panels of transformer room of EDGS 3 at the Cattenom NPP.



9 © PHOTOTHÈQUE LGN



10 © N. THOUVENIN



tives des assemblages). De nombreux points de contrôle ont été réalisés afin de s'assurer de la bonne exécution des plans de ferrailage.

En complément de cette importante densité de ferrailage, plus de 1 300 inserts (platinas, rails, cadres, bornes de terre) sont mis en place dans chaque bâtiment. Ces inserts sont fixés mécaniquement sur la première peau de coffrage (figure 9) puis soudés au ferrailage (figure 10) puis soudés au ferrailage (figure 10). Les fixations sont alors retirées et les inserts présents sur la deuxième peau sont alors directement implantés et soudés au ferrailage (figure 10).

Des liaisons par soudure d'aciers doux sont ajoutées à l'ensemble des inserts pour les relier au réseau de terre du bâtiment. Certains aciers de la peau extérieure du ferrailage sont soudés entre eux selon une maille de 5 m x 5 m afin de constituer une cage de Faraday.

En cas d'écart (impossibilité technique pour mettre en place un acier, absence d'un acier, insert hors tolérance, ...), des actions correctives sont mises en place après validation d'EDF et du bureau d'étude si besoin.

LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

Le bâtiment DUS est surmonté d'une charpente métallique de 8,6 m de hauteur. Cette charpente de plus de 80 t environ (77 t pour Cattenom, 85 t pour Chinon, Chooz, Dampierre, 105 t pour Gravelines), est dimensionnée aux Eurocodes. Elle est destinée à protéger les équipements électromécaniques en

11- Pose de la charpente métallique sur le DUS 1 de la CNPE de Gravelines.

12- Vue des équipements en toiture sur le CNPE de Gravelines.

11- Placing steel structure on EDGS 1 at the Gravelines NPP.

12- View of rooftop equipment at the Gravelines NPP.

toiture (aéroréfrigérants et ventilation) des agressions extérieures telles que la grêle, la neige, et les projectiles engendrés par une tornade (figure 12).

Sa fabrication, rigoureusement surveillée par les inspecteurs de la Direction Industrielle d'EDF, répond aux exigences de la norme NF EN 1090-2 de 2011, mais également aux exigences d'EDF définies au travers de l'ETC-C (EPR Technical Code for Civil Works). La réalisation des soudures répond également aux exigences d'EDF pour la mise en œuvre manuelle des procédés de soudure semi-automatiques, issues du REX d'EDF dans la fabrication de l'EPR. Cette note introduit notamment les exigences suivantes :

→ "Habilitation" des soudeurs en sus de leur qualification habituelle suivant la norme NE EN ISO 9606-1, par la réalisation de tests pratiques d'aptitude au soudage.

→ Avant démarrage des fabrications, validation des Descriptifs de Modes Opérateurs de Soudage (DMOS) associés aux soudures interpénétrées par la réalisation de coupons de pré-production.

→ Pour les cinq premiers assemblages réalisés suivant un même DMOS, le taux de sondage requis par la norme 1090-2 est doublé et la longueur minimale à contrôler est de 900 mm.

→ Pour chaque technique de contrôle non destructif (CND) et chaque contrôleur, un contrôle contradictoire doit être réalisé sur les cinq premiers contrôles réalisés.

De classe d'exécution EXC3, la charpente métallique des DUS se compose d'aciers de nuance S275 à S355 et de PRS (profilés reconstitués par soudage) selon les sites. La mise en forme de la structure principale a été réalisée par cintrage à froid. Le recours à des profilés de qualité Z15 à Z35 a été nécessaire pour répondre aux exigences d'arrachement lamellaire. Le dimensionnement des soudures est largement enveloppe : apothèmes forfaitaires selon la nuance d'acier, soudures pleine pénétration dès lors que l'épaisseur de la plus fine des tôles soudées dépasse 16 mm (plus de 17 000 cm³ de cordons interpénétrés et plus de 85 000 cm³ de soudures d'angle). ▷



L'enveloppe de protection intérieure de la charpente est constituée de filets ayant fait l'objet d'essais de qualification par EDF pour résister à la tornade et aux projectiles associés.

L'enveloppe extérieure est constituée de métal déployé cintré, galvanisé, peint. L'ensemble de la charpente est revêtu d'une protection anticorrosion type PED ou PEC 200, de classe de corrosivité C5 en raison des sites les plus exposés au risque de corrosion en milieu marin. Le montage sur site est réalisé en trois blocs 33 t, 46 t, et 55 t avec appareils de levage (pour les charpentes les plus importantes) dans un délai d'environ deux mois. Le levage sur la toiture des DUS dure quant à lui de un à deux jours et requiert l'emploi de grues mobiles de capacité allant de 300 à 500 t suivant les configurations de levage de chaque site (figure 11).

Un système de guidage par des cônes centreurs a été mis au point pour faciliter l'accostage de la charpente sur ses 31 ancrages, pré-scellés dans les acrotères avec une précision de +/-5 mm (figure 13). □



13

© N. THOUVENIN

13- Soudure d'une contre-platine avec cônes centreurs.

13- Welding a back panel with centring cones.

PRINCIPALES QUANTITÉS PAR DUS

- 1 900 m³ de béton
- 350 t d'acier pour les armatures
- 1 050 platines d'acier incorporés dans la structure
- 25 t d'appareils d'appui élastomère fretté
- 80 à 105 t de structure métallique
- 1 000 m² de filet anti-tornade
- 18 portes métalliques spécifiques résistances au séisme
- 1 porte de 5,00 m x 4,00 m résistante au séisme extrême
- Dimensions du bâtiment au sol : 12 x 24 m
- Hauteur du bâtiment : 25 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : EDF
MAÎTRE D'ŒUVRE : EDF DIPDE
ENTREPRISE : Léon Grosse Nucléaire

SOUS-TRAITANTS

CHARPENTE MÉTALLIQUE GÉNÉRALISATION : Renaudat Centre Construction
CHARPENTE MÉTALLIQUE CATTENOM : Cmbc, Orys
TERRASSEMENTS : Eurovia, Colas
ARMATURES : Class armaturi, Ruhl, Amsa
MENUISERIE (FABRICATION) : Baumert, Sommer
MENUISERIE (POSE) : Spie, Orys
SERRURERIE (FABRICATION) : Orys, Andriollo
SERRURERIE (POSE) : Orys, Endel
ÉTANCHÉITÉ : Smac, Etandex
PEINTURE : Prezioso, Masci, Dpi, Etandex

ABSTRACT

CIVIL WORKS FOR IMPROVED SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS - EMERGENCY DIESEL GENERATING SETS (EDGS)

LÉON GROSSE NUCLÉAIRE : FARID MERABET - MARION BONNET - PIERRE CHARLES - PIERRE DEVLAMYNCK - BENOIT PHILIPPE

Following the disaster caused by the tsunami at the Fukushima nuclear power facility in Japan in March 2011, the nuclear safety authorities launched a vast programme to strengthen the resistance of nuclear power plants to aggression by extreme natural forces. In this context, they asked Electricité de France (EDF), the operator of the nuclear plants, to design additional safety devices to cope with aggression from extreme natural forces and weather conditions. The emergency diesel generating sets (EDGS's) were designed to perform the vital functions capable of cooling the reactor in the event of major damage. The EDGS's are sheltered and protected in a bunker-type concrete building. Léon Grosse Nucléaire is constructing 20 of the 58 buildings at five different power stations in France. □

LA INGENIERÍA CIVIL AL SERVICIO DE LA SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES - LOS DIÉSELES DE ÚLTIMO RECURSO (DUR)

LÉON GROSSE NUCLÉAIRE : FARID MERABET - MARION BONNET - PIERRE CHARLES - PIERRE DEVLAMYNCK - BENOIT PHILIPPE

Tras la catástrofe provocada por el tsunami en la central nuclear de Fukushima, en Japón, en marzo de 2011, las autoridades de seguridad nuclear lanzaron un amplio programa de refuerzo de la resistencia de las centrales nucleares a las agresiones naturales extremas. En este marco, pidieron a la sociedad operadora de centrales nucleares Electricité de France (EDF) que diseñara elementos de seguridad adicionales para hacer frente a agresiones naturales y climáticas extremas. Los Diésel de Último Recurso (DUR) tienen como función garantizar las funciones vitales, permitiendo refrigerar el reactor en caso de avería grave. Los DUR se almacenan protegidos en un edificio de hormigón tipo búnquer. Léon Grosse Nucléaire realiza 20 de los 58 edificios en 5 centrales diferentes del territorio francés. □

VERS UNE AUTONOMIE 100% RENOUEVELABLE DES ZONES NON INTERCONNECTÉES À L'HORIZON 2030

AUTEURS : DAVID CHOTARD, RESPONSABLE DE PROJETS CLIMAT-ÉNERGIE, ARTELIA, FRANCE - FRÉDÉRIC BABONNEAU, VICE-PRÉSIDENT, ORDECSYS, SUISSE, ET PROFESSEUR, ESCUELA DE NEGOCIOS, UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ, CHILI - STÉPHANE BISCAGLIA, INGÉNIEUR SERVICE RÉSEAUX ET ÉNERGIES RENOUEVELABLES, ADEME, FRANCE - NICOLAS MAIRET, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE & DEMANDE, ENERDATA, FRANCE

LA LOI DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FIXE UN OBJECTIF D'AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE AUX TERRITOIRES INSULAIRES DANS UN CONTEXTE DE COÛTS D'APPROVISIONNEMENT EN ÉLECTRICITÉ TRÈS SUPÉRIEURS À CEUX DE LA MÉTROPOLE, ET OÙ LE PLAFOND DE 30% DE PUISSANCE D'ÉNERGIE RENOUEVELABLE (ENR) VARIABLE DANS LE MIX ÉLECTRIQUE EST CERTAINES FOIS ATTEINT. IL EST DONC NÉCESSAIRE D'ÉTUDE LES IMPLICATIONS TECHNICO-ÉCONOMIQUES, L'ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET LA STABILITÉ DU RÉSEAU D'UN DÉVELOPPEMENT MASSIF DES ENR ÉLECTRIQUES.

DEMANDE ÉLECTRIQUE ET POTENTIELS ENR ACCESSIBLES DES SCÉNARIOS "VERS L'AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE"

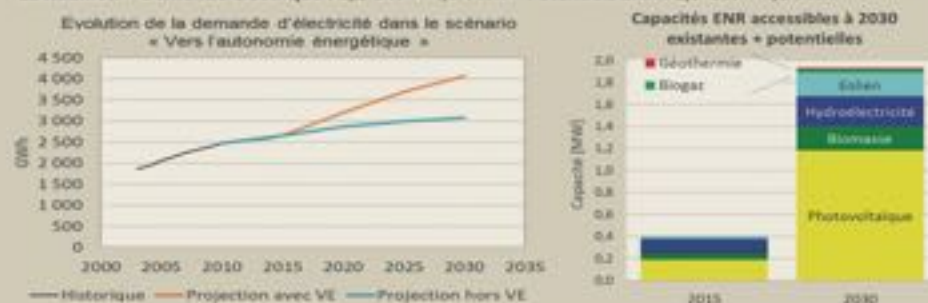
Guadeloupe – Demande électrique : 0,5 GW – 2,1 TWh – Potentiels ENR : 1,5 GW – 4,6 TWh



Martinique – Demande électrique : 0,4 GW – 1,8 TWh – Potentiels ENR : 1,6 GW – 2,7 TWh



La Réunion – Demande électrique : 1,2 GW – 4,0 TWh – Potentiels ENR : 1,9 GW – 4,8 TWh



La première série de résultats présentée ici concerne les territoires de la Guadeloupe, la Martinique et la Réunion.

L'étude est actuellement en cours sur d'autres Zones Non Interconnectées (ZNI), à savoir la Corse, la Guyane et Mayotte.

PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

Le périmètre de l'étude couvre l'ensemble de la demande électrique de l'île - tous secteurs d'activité et tous usages - y compris les usages électriques du transport.

Le réseau électrique modélisé et simulé est le réseau de transport d'électricité. Les réseaux de distribution n'ont pas été modélisés.

Les coûts associés aux éventuels renforcements des réseaux de distribution ne sont donc pas inclus dans les résultats économiques présentés ici - ceux associés au réseau de transport étant bien inclus.

1- Demande électrique et potentiels ENR accessibles des scénarios "Vers l'autonomie énergétique".

1- Electricity demand and potential REN available in "Towards energy independence" scenarios.

MODÈLES UTILISÉS

L'étude a consisté en une reconstitution et projection de la demande électrique, une évaluation des potentiels d'énergie renouvelable (ENR), une modélisation du réseau de transport électrique, une optimisation technico-économique du système électrique, et enfin une validation des équilibres statiques et dynamiques sur des points critiques de fonctionnement du système.

Les scénarios d'évolution de la demande d'électricité ont été réalisés à l'aide de l'outil MedPro, développé par Enerdata, qui permet de réaliser des projections de la demande électrique et des courbes de charge associées. Le modèle MedPro est un modèle de type technico-économique (ou *bottom-up*) s'appuyant sur une description fine des consommations d'énergie et de leurs déterminants. Ce modèle a été calé sur les scénarios prospectifs de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie des différents territoires.

Les potentiels en énergies renouvelables (ENR) proviennent des études de potentiels existantes, qui lorsque nécessaire ont été complétées par des évaluations spécifiques grâce à différents modèles propres à chaque filière et développés par Artelia.

L'optimisation technico-économique des systèmes électriques sur les différents scénarios prospectifs a été réalisée avec le modèle ETEM-GR, développé par Ordecysys. Ce modèle open-source est utilisé ici pour calculer sur une période donnée (2015-2030) l'évolution optimale du parc de production, pour un certain nombre de critères (économiques, environnementaux, etc.) et sous certaines contraintes (demande globale, équilibre offre-demande, gisements, etc.). Ce modèle permet de proposer une évolution du système électrique jusqu'en 2030 qui minimise, sous contrainte, un coût total actualisé. Le modèle a été validé par un contrôle de cohérence avec les mix de production électrique effectivement observés en 2015.

Enfin, les validations statiques et dynamiques du système électrique optimisé ainsi obtenu ont été réalisées par Artelia avec le logiciel PowerFactory 2017. PowerFactory, développé par la société DlgSILENT, bénéficie d'un retour d'expérience de plus de 25 ans. Il s'agit de l'un des outils de référence pour la simulation, l'analyse et la modélisation des réseaux électriques. Toutefois, il faut noter que ce logiciel a été développé pour l'étude des systèmes traditionnels majoritairement construits autour

de machines tournantes synchronisées au réseau. Il conviendra donc de rester prudent sur les conclusions issues des résultats obtenus dans le cadre d'un système à très fort taux de productions interfacées par des onduleurs.

BILAN DE LA DEMANDE ÉLECTRIQUE ET DE L'OFFRE TECHNOLOGIQUE

Cinq scénarios prospectifs ont été étudiés, chacun caractérisant un futur possible induit par différents contextes internationaux et locaux. Les principales spécificités de ces scénarios sont reprises ci-après.

Scénario "Tendanciel" : découlant des choix et contraintes actuels sur la demande et l'offre technologique.

Scénario "Avantage Thermique" : se plaçant dans un contexte économique favorable aux énergies conventionnelles avec un effort tendanciel de maîtrise de la demande énergétique.

Scénario "Avantage Technologique" : se plaçant dans un contexte technique optimiste avec l'atteinte de la maturité commerciale d'un plus grand nombre de technologies de production ENR, et une meilleure diffusion des technologies de maîtrise de la demande d'énergie.

Scénario "Tous Feux Verts" : Interdi-

sant les importations de biomasse, libérant les contraintes réglementaires et sociales non réhabilitaires et forçant l'atteinte d'un mix 100% ENR à 2030. Ce scénario s'apparente à une autonomie électrique.

Scénario "Vers l'Autonomie Énergétique" : interdisant les importations de biomasse, convertissant l'ensemble du transport routier (hors poids lourds) en véhicules électriques et forçant l'atteinte d'un mix 100% ENR à 2030. Ce scénario est peu réaliste à 2030 du fait des dynamiques de pénétration des véhicules électriques dans les parcs automobiles, mais constitue une forme de stress test du système énergétique de l'île.

La comparaison de la demande et des potentiels accessibles du scénario "vers l'autonomie énergétique" pour chaque territoire (figure 1) montre que l'île de la Réunion présente un potentiel de production annuelle d'électricité très proche de la demande ce qui implique une tension forte sur les potentiels.

Toutefois une part importante de ces potentiels est de nature à apporter une production de base, ce qui est un atout pour le maintien de l'équilibre offre-demande.

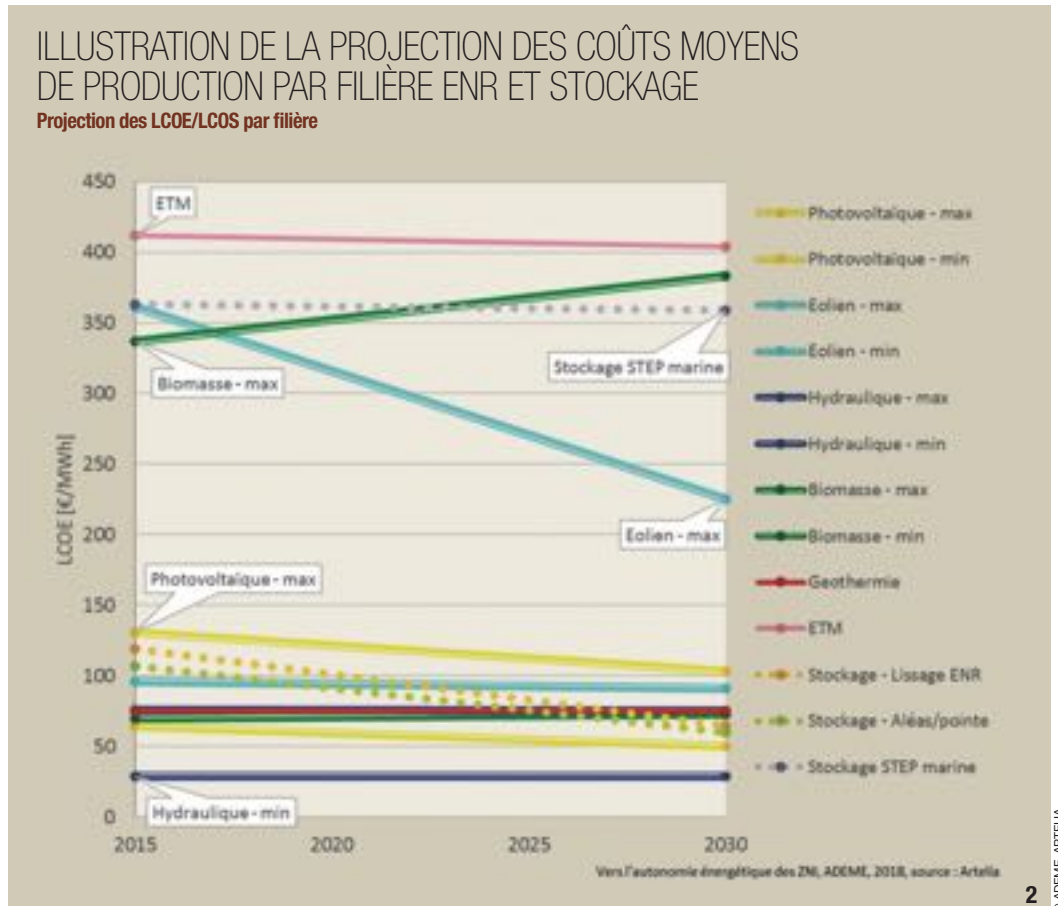
De son côté, l'île de la Martinique ne dispose de pratiquement aucun potentiel capable d'apporter une production de base, ce qui constitue une contrainte forte pour le maintien de l'équilibre offre-demande à tout instant et la capacité à disposer de réserve en cas d'incident sur un moyen de production même si son potentiel ENR est largement supérieur à la demande.

Les coûts associés à chaque technologie sont reconstruits à partir de ratios d'investissement [€/MW], de charges fixes [€/ (MW.an)] et de charges variables [€/ (MWh.an)].

Ces éléments permettent de calculer le coût global de production de l'énergie qui dépend donc des caractéristiques

2- Illustration de la projection des coûts moyens de production par filière ENR et stockage.

2- Illustration of projected average production costs for each RE process and storage.



de la ressource propre à chaque site de production. À titre d'exemple, une illustration des coûts moyens à l'échelle de l'île par filière sur La Réunion est donnée (figure 2).

Lorsque différentes technologies existent pour une même filière l'enveloppe des coûts est présentée sur le graphique (coûts minimum et maximum). Sur l'année 2015, le modèle reconstitue un coût complet de production cohérent avec celui publié par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).

Les hypothèses de projection des coûts des différentes technologies retenues sont toutes conservatrices par rapport aux différentes études publiées pour chaque filière.

MIX ÉNERGÉTIQUES OPTIMUM POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS PROSPECTIFS

Parmi les scénarios prospectifs étudiés, deux groupes peuvent être distingués selon la présence ou non d'une contrainte sur le mix électrique 100% ENR en 2030 et la possibilité ou non d'importer de la biomasse.

3- Mix énergétique en 2030 selon les scénarios [GWh/an].

3- Energy mix in 2030 according to the scenarios [GWh/year].

Les mix de production électrique en 2030 obtenus sur les différents territoires pour chaque scénario sont illustrés par un graphique (figure 3).

SCÉNARIOS NON CONTRAINTS : VERS UN MIX ÉLECTRIQUE 100% RENEUVELABLE

Les scénarios prospectifs pour lesquels l'algorithme d'optimisation n'est pas contraint de respecter un mix électrique 100% renouvelable en 2030 sont les scénarios "Tendanciel", "Avantage thermique", et "Avantage technologique".

À l'exception de la Martinique, qui ne possède pas de centrale thermique à flamme et ne peut donc bénéficier

d'importation de biomasse sans nouveaux investissements, l'ensemble des scénarios conduit à des mix 100% ENR en 2030. Dans tous les cas, à l'horizon 2030, les taux d'ENR correspondant aux trajectoires technico-économiques optimales sont supérieurs à 80% des mix. Cette augmentation s'explique également par le fait que le modèle n'est pas autorisé à investir dans de nouvelles technologies fossiles, impliquant donc par construction que toute augmentation de demande soit satisfaite par une production ENR.

Pour la Martinique, seuls les scénarios "Tendanciel" et "Avantage thermique" conservent du diesel en 2030. Pour les autres scénarios et territoires, l'optimisation conduit à un arrêt anticipé de cette filière en 2025. Celle-ci ne serait donc plus compétitive par rapport aux énergies renouvelables dès 2025. Ce déclassement anticipé des centrales thermiques diesel montre que le fait de ne pas avoir rendu possible de nouveaux investissements dans de telles centrales n'est pas si contraignant.

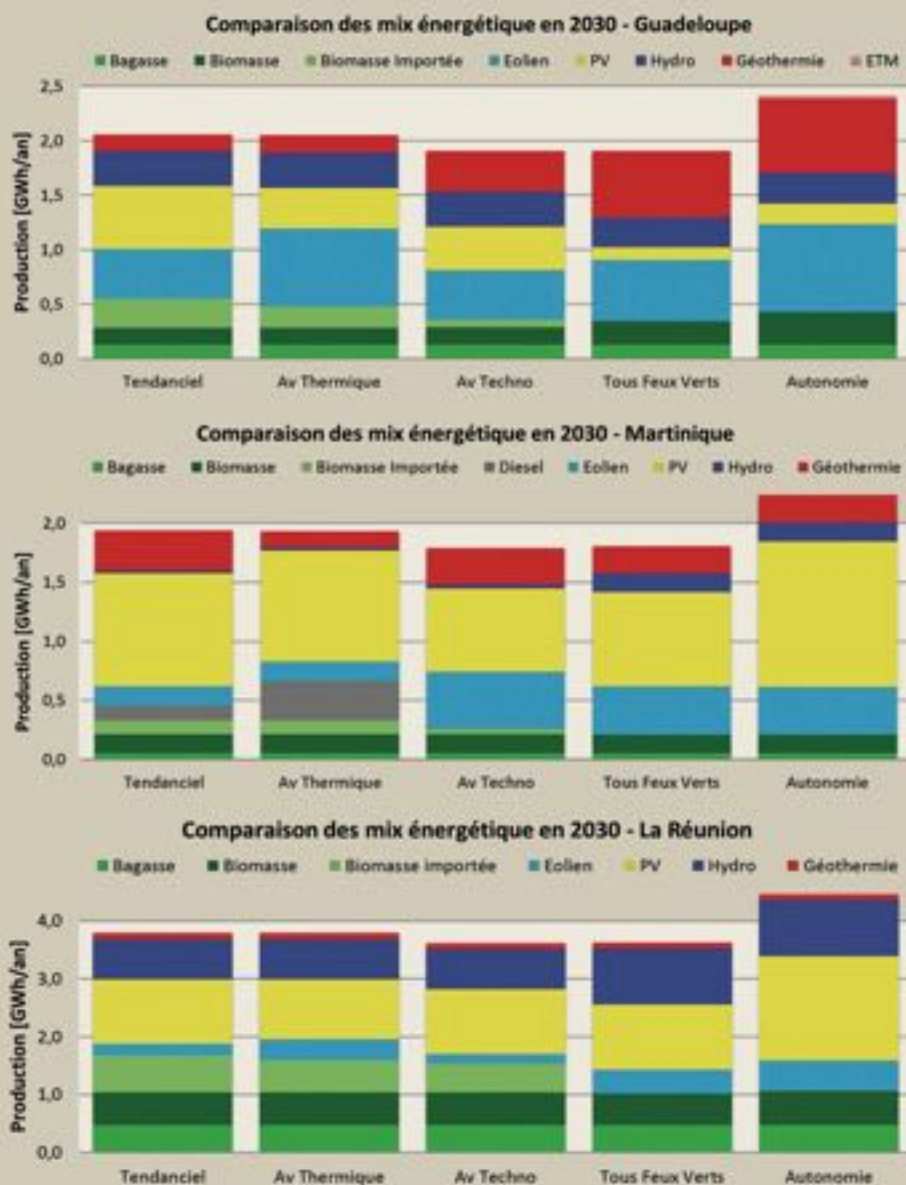
Les mix de production sont spécifiques à chaque territoire.

Le mix électrique renouvelable de La Réunion est dominé par les ressources biomasse, et dans une moindre mesure photovoltaïque puis éolien, tandis que les filières éolien et photovoltaïque ont une place équivalente dans celui de la Guadeloupe, suivis de la biomasse et de l'hydroélectricité, et que celui de la Martinique est dominé par le photovoltaïque suivi de la géothermie et de la biomasse. Pour cette dernière, l'ouverture au potentiel "éolien offshore" dans le scénario "Avantage Technologique" fait entrer une part significative de cette ressource dans le mix électrique de ce scénario.

Du fait du caractère variable des ressources photovoltaïques et éoliennes et de leur niveau de pénétration dans les mix électriques, d'importants moyens de stockage sont nécessaires pour être en mesure de garantir l'équilibre offre-demande à tout instant. Ils sont estimés, selon le scénario, entre 125 MW et 255 MW en Guadeloupe, 270 MW et 500 MW en Martinique, et 340 MW à 420 MW à La Réunion (figure 4).

Les moyens retenus pour cela sont de type électrochimique (batteries) et station de pompage (STEP) lorsque les potentiels existent sur l'île. Le faible niveau de stockage nécessaire en Guadeloupe en comparaison des autres territoires, s'explique par la faible part du photovoltaïque dans le mix électrique.

MIX ÉNERGÉTIQUE EN 2030 SELON LES SCÉNARIOS [GWh/an]



Enfin, malgré l'augmentation significative des puissances installées, les renforcements nécessaires restent très limités grâce au caractère diffus d'une part importante des installations.

SCÉNARIOS CONTRAINTS : VERS L'AUTONOMIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Les scénarios prospectifs pour lesquels l'algorithme d'optimisation est contraint d'atteindre un mix électrique 100% renouvelable en 2030 sont les scénarios "Tous feux Verts" et "Vers l'autonomie énergétique".

À nouveau, les mix électriques de ces scénarios sont spécifiques à chaque territoire, avec une dominante des filières éolien et géothermie pour la Guadeloupe, photovoltaïque et dans une moindre mesure éolien pour la Martinique, et photovoltaïque et dans une moindre mesure hydroélectricité et biomasse pour La Réunion.

Une particularité de la Guadeloupe est que plus le taux d'ENR atteint est élevé, plus le recours au photovoltaïque baisse, au profit de la géothermie - filière pouvant assurer une base - mais aussi de l'éolien - filière dont la production, bien que variable, ne présente pas les variations diurnes du photovoltaïque. Si pour la Guadeloupe, le besoin en stockage reste limité entre 95 MW et 195 MW du fait de la particularité évoquée au paragraphe précédent, pour les autres territoires, ces scénarios nécessitent un important déploiement de capacité de stockage, allant de 460 MW à 670 MW en Martinique et 600 MW à 875 MW à La Réunion du fait de la place du photovoltaïque. En ce qui concerne les besoins de renforcement du réseau de transport d'électricité, ceux-ci restent encore limités.

CONSÉQUENCES ÉCONOMIQUES DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

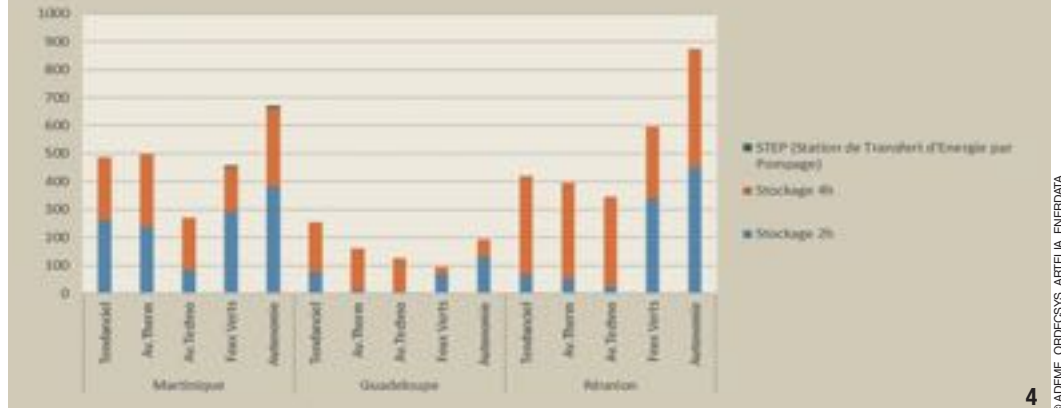
Les conséquences économiques des différents scénarios sont illustrées par un graphique (figure 5).

En Guadeloupe, le minimum d'investissement est atteint avec le scénario "Tous feux verts" grâce à l'accès à un potentiel géothermique important dans ce scénario.

En Martinique et à La Réunion, le scénario pour lequel le niveau d'investissement est le plus faible est le scénario "Avantage technologique".

En sommant les investissements avec les charges d'exploitation et d'entretien-maintenance, le surinvestissement du scénario "Tous feux verts" est totale-

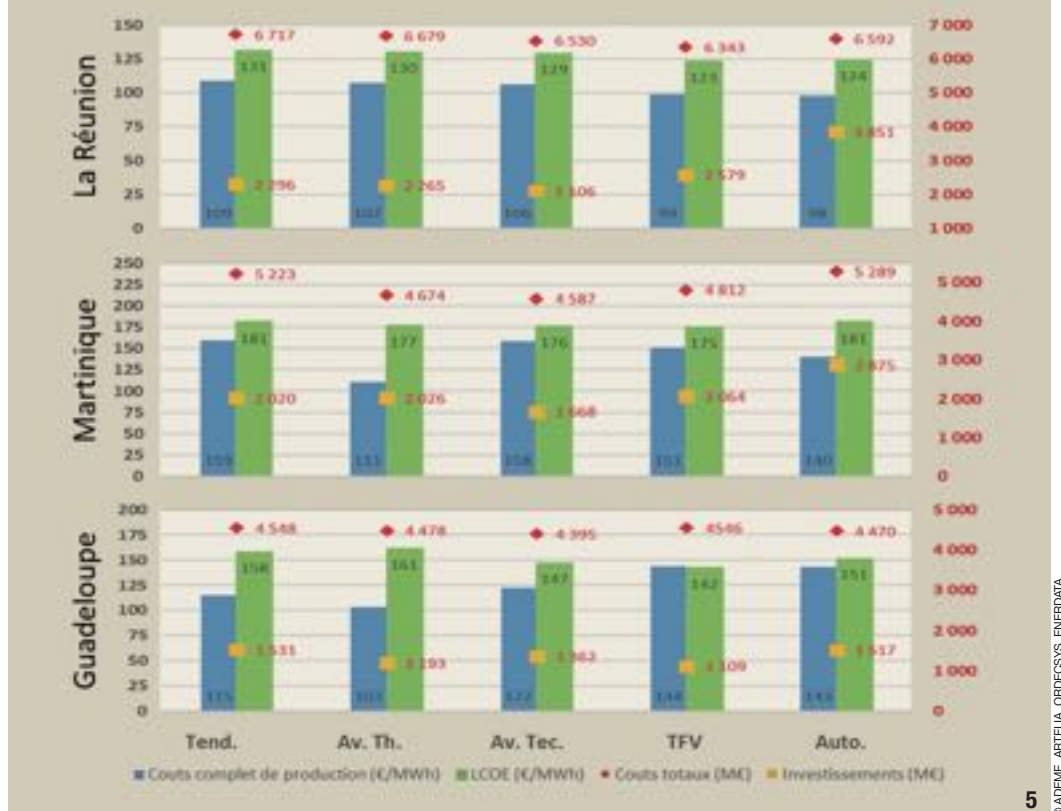
STRUCTURE DU STOCKAGE EN 2030 SELON LES SCÉNARIOS [MW]



4

© ADEME, ORDECYS, ARTELIA, ENERDATA

IMPLICATIONS ÉCONOMIQUES DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS



5

© ADEME, ARTELIA, ORDECYS, ENERDATA

4- Structure du stockage en 2030 selon les scénarios [MW].

5- Implications économiques des différents scénarios.

4- Storage structure in 2030 according to the scenarios [MW].

5- Economic implications of the various scenarios.

ment compensé par la réduction des charges par rapport au scénario tendanciel quel que soit le territoire.

De plus, à La Réunion, ce scénario apparaît comme étant celui avec le plus faible coût total.

En rapportant les coûts totaux à la quantité d'énergie produite sur la durée de vie des installations, l'indicateur obtenu, appelé LCOE, est aussi le plus faible pour ce scénario, quel que soit le territoire.

Le scénario "Vers l'autonomie énergétique" présente un LCOE équivalent à celui du scénario "Tous feux vert" à La Réunion, équivalent à celui du scé-

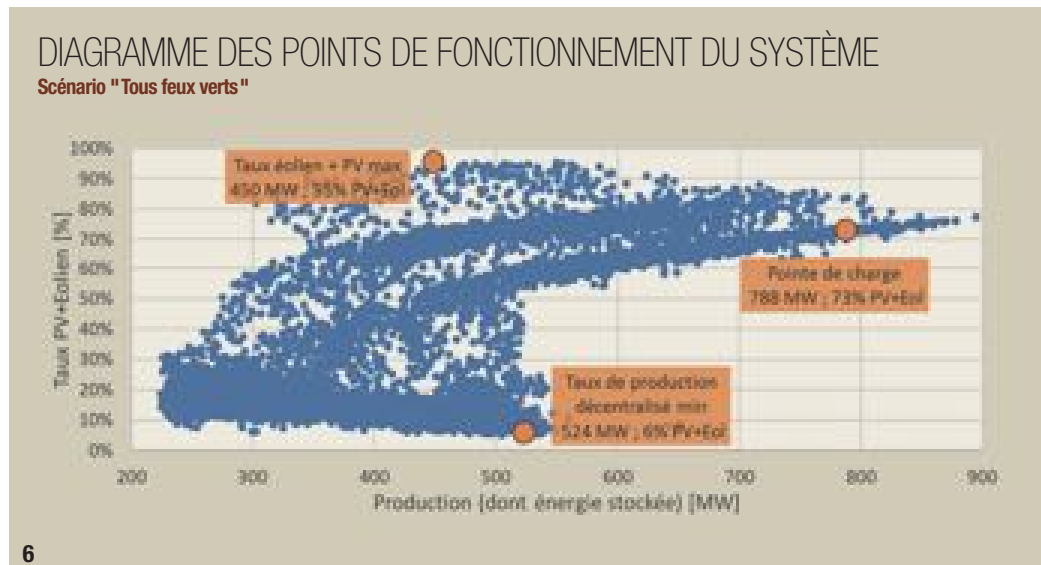
nario "Tendanciel" en Martinique, et inférieur au scénario "Tendanciel" en Guadeloupe.

L'autonomie énergétique n'est donc pas plus chère, en coût global, que le tendanciel. Notons de plus que les économies de carburant des véhicules thermiques convertis en électrique ne sont pas comprises dans ce bilan.

Notons enfin, que les faibles coûts complets de production du scénario "Avantage Technologique" s'expliquent par des hypothèses très favorable aux filières fossiles de ce scénario et, en particulier, à de faibles coûts d'import et de taxe carbone.

ÉTUDE DES STABILITÉS STATIQUES ET DYNAMIQUES

Étant données les parts très importantes des ressources variables dans les mix de production, la validation technique de ces scénarios nécessite d'étudier le comportement de ces systèmes électriques face à des incidents perturbateurs. Pour cela, le système électrique a été étudié sur trois points de fonctionnement particuliers - illustration pour La Réunion (figure 6) - correspondant aux situations suivantes : taux de production décentralisée minimal en 2030, pointe annuelle de charge sur l'année 2030, taux de pénétration maximum des productions éolienne et photovoltaïque sur l'année 2030. Sur le point pour lequel l'inertie du système est la plus faible (point n°3), trois événements ont été simulés : court-circuit sur la ligne la plus chargée, perte soudaine du plus gros groupe de production, perte soudaine de l'ensemble de la production photovoltaïque diffuse sur le poste source pour lequel la production est la plus forte. Pour ces trois événements, malgré la très faible inertie du réseau électrique se traduisant par une variation rapide de sa fréquence, la stabilité dynamique du système est assurée grâce au temps de réponse très rapide des batteries. Un tel système électrique peut donc rester stable face à des incidents significatifs. Néanmoins, en raison des hypothèses simplificatrices présent pour



6- Diagramme des points de fonctionnement du système.

6- Chart of system operating points.

la modélisation du réseau, ce résultat, bien qu'encourageant, ne permet pas de conclure à une stabilité et une sécurité assurée sur le système réel dans toutes les conditions de fonctionnement. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : Ademe

GESTION DE PROJET, ÉTUDE DES POTENTIELS, ÉTUDES DE STABILITÉ RÉSEAU, ANALYSE ÉCONOMIQUE : Artelia

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE : Ordecsys

MODÉLISATION DE LA DEMANDE ÉLECTRIQUE : Enerdata

PRINCIPALES QUANTITÉS

GUADELOUPE

DEMANDE ÉLECTRIQUE : 0,5 GW - 2,1 TWh

POTENTIELS ENR : 1,5 GW - 4,6 TWh

AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE : coût global de l'énergie réduit de 4% avec 1,5 milliard € d'investissement dans de nouveaux moyens production d'énergie renouvelable, de stockage et de réseau électrique

MARTINIQUE

DEMANDE ÉLECTRIQUE : 0,4 GW - 1,8 TWh

POTENTIELS ENR : 1,6 GW - 2,7 TWh

AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE : maintien du coût global de l'énergie avec 2,9 milliards € d'investissement dans de nouveaux moyens production d'énergie renouvelable, de stockage et de réseau électrique

LA RÉUNION

DEMANDE ÉLECTRIQUE : 1,2 GW - 4,0 TWh

POTENTIELS ENR : 1,9 GW - 4,8 TWh

AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE : coût global de l'énergie réduit de 5% avec 3,9 milliards € d'investissement dans de nouveaux moyens production d'énergie renouvelable, de stockage et de réseau électrique

ABSTRACT

TOWARDS 100% RENEWABLE INDEPENDENCE OF NON-INTERCONNECTED ZONES ON THE 2030 HORIZON

DAVID CHOTARD, ARTELIA - FRÉDÉRIC BABONNEAU, ORDECSYS - STÉPHANE BISCAGLIA, ADEME - NICOLAS MAIRET, ENERDATA

The study initiated by French environment and energy management agency ADEME involved modelling and optimising the electricity system on forecast trends in 2030 and verifying its static and dynamic stability for some critical operating conditions. The results show that by making significant use of storage capacity, a 100% REn electricity mix is possible and goes hand-in-hand with a fall in the average cost of power production. However, from an independence viewpoint, the conversion of vehicles to electric power will mean that virtually all the potential REn available will be exploited, which highlights the vulnerability of such a situation, requiring extensive work on energy demand management. □

HACIA UNA AUTONOMÍA 100% RENOVABLE DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS EN EL HORIZONTE 2030

DAVID CHOTARD, ARTELIA - FRÉDÉRIC BABONNEAU, ORDECSYS - STÉPHANE BISCAGLIA, ADEME - NICOLAS MAIRET, ENERDATA

Iniciado por la Ademe (Agencia francesa de Medio Ambiente y Control de la Energía), el estudio ha consistido en modelizar y optimizar el sistema eléctrico en trayectorias prospectivas en el horizonte 2030 y comprobar la estabilidad estática y dinámica en varias condiciones de funcionamiento críticas. Los resultados revelan que mediante una elevada capacidad de almacenamiento es posible un mix eléctrico 100% renovable que conlleva un descenso del coste medio de producción de la energía. Sin embargo, en términos de autonomía, la conversión a la electricidad de los vehículos obliga a explotar la casi totalidad del potencial de energías renovables accesibles, lo que demuestra la fragilidad de esta situación, que requiere un importante trabajo de control de la demanda de energía. □



Nf

7734

123.5

7734
7734
VA



LIGNE À GRANDE VITESSE BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE

AUTEUR : SIDOINE SERRAJ, DIRECTEUR DU PÔLE FERROVIAIRE, EIFFAGE ÉNERGIE SYSTÈMES FERROVIAIRES

LA LIGNE À GRANDE VITESSE BRETAGNE-PAYS-DE-LA-LOIRE A OBTENU SON AUTORISATION DE MISE EN SERVICE COMMERCIALE LE 15 MAI 2017. ELLE A ÉTÉ INAUGURÉE LE 1^{er} JUILLET 2017. CE CHANTIER PHARAONIQUE QUI A DURÉ PRÈS DE 6 ANS, PILOTÉ PAR LES ÉQUIPES D'EIFFAGE AVEC CELLES DE SNCF RÉSEAU, A RASSEMBLÉ EN POINTE PLUS DE 4 000 PERSONNES. AU-DELÀ DU DÉFI HUMAIN, C'EST UNE VÉRITABLE PROUESSE TECHNIQUE RÉALISÉE PAR L'ENSEMBLE DES ÉQUIPES DANS LE DÉLAI IMPARTI. UN VÉRITABLE CONCENTRÉ DE TECHNOLOGIE PERMET LA CIRCULATION DES TRAINS À 320 km/h EN TOUTE SÉCURITÉ.



PRÉSENTATION DU PROJET

Avec ses 182 km de double voie entre Connerré et Rennes, en prolongement de la LGV Atlantique, ce nouveau tronçon permet désormais de relier Paris à Rennes en 1h26, soit un gain de temps de 37 min. Le projet a aussi permis le développement de nouvelles dessertes entre Rennes, Laval, Angers et Nantes via la "virgule de Sablé-sur-Sarthe". Ce raccordement permet, pour la première fois en France, la circulation de ZTER sur une LGV à une vitesse de 200 km/h, et permet ainsi un gain de temps de l'ordre de 45 minutes en interrégional (figure 2).

Les trains de fret peuvent également contourner la gare du Mans, en empruntant 25 km de LGV entre La-Millesse et Connerré. Aucune nouvelle gare n'a été créée afin d'utiliser les gares existantes des centres ville de Laval et du Mans. En plus des

182 km de nouvelle ligne, c'est ainsi 32 km de longueur supplémentaire de raccordements qui ont été construits sur les 8 jonctions au réseau classique. Ce chantier, d'un montant de 3,4 M€, s'est déroulé de juillet 2011 à mai 2017. Il a été réalisé sous la forme d'un contrat de partenariat public-privé entre SNCF Réseau et Eiffage Rail Express. Eiffage était ainsi le Maître d'Ouvrage des installations et des ouvrages nouvellement créés en dehors du Réseau Ferré National, de la conception-construction à la mise en service.

1- ERTMS.
2- Tracé de la LGV BPL.

1- ERTMS.
2- Alignment of the BPL HSL.

Eiffage est également le mainteneur des installations jusqu'en 2036 en tant que gestion d'infrastructures.

LES ÉQUIPEMENTS FERROVIAIRES

S'agissant d'équipements, installations, appareils formant un système ferroviaire performant, la notion d'intégration et de système a été tout au long du projet au cœur des organisations.

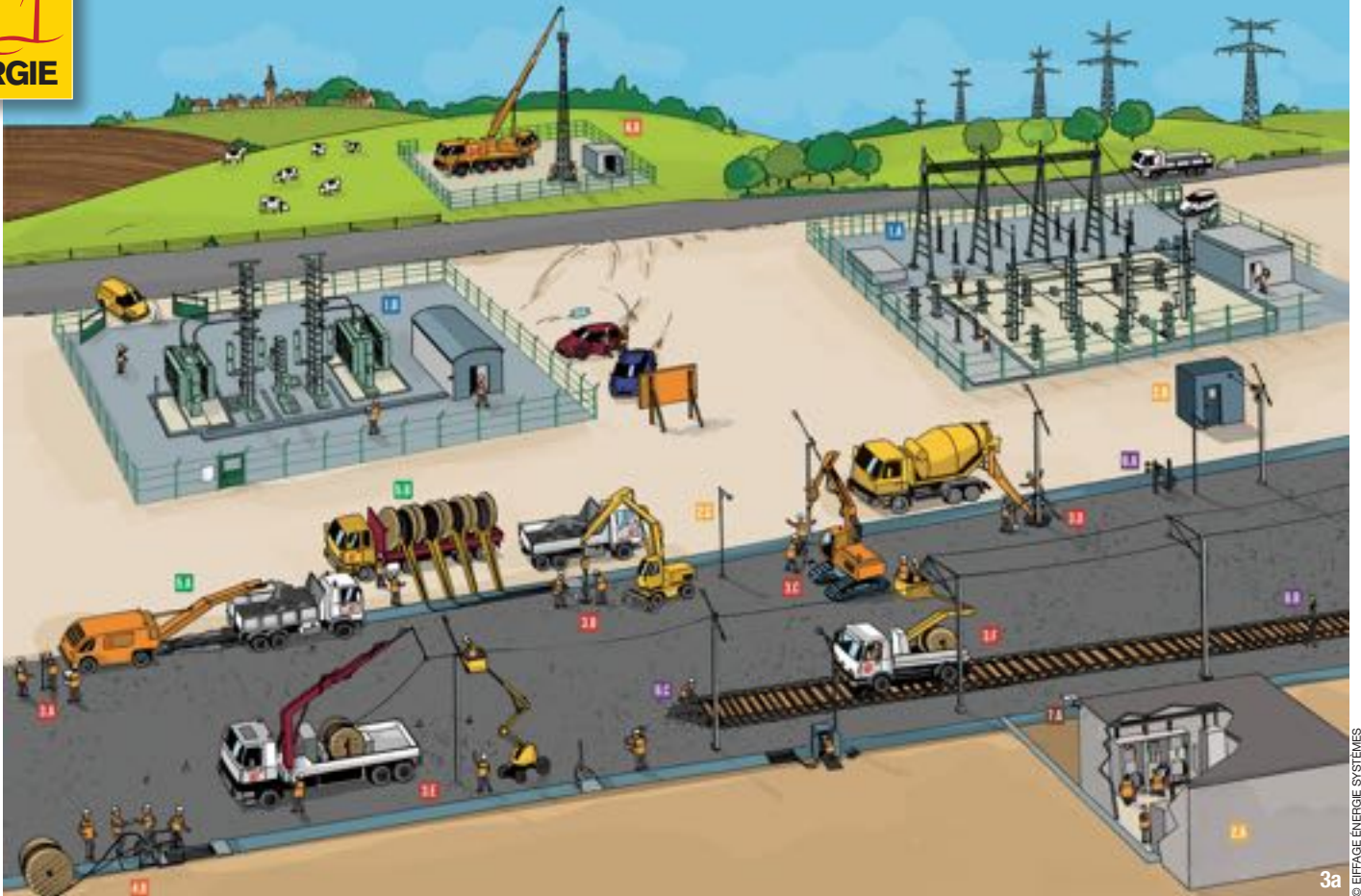
Les équipements ferroviaires ont ainsi été gérés et organisés par une seule entité de la branche Eiffage Énergie Systèmes autour de sept sous-ensembles (figures 3a et 3b) :

→ Équipements d'alimentation de traction 25 kV dit "EALE" : Sous-stations électriques, lignes bifilaire ;
→ Alimentation des auxiliaires : Alimentations basses tension (24 V, 110 V, 230 V) des équipements en ligne et dans les bâtiments tech-

niques, les éclairages en ligne et des bases de maintenance ;

→ La caténaire ;
→ Les télécommunications fixes (fibre optique, réseaux, téléphonie, etc.) et le réseau radio GSM-R ;
→ Les artères câblées ;
→ La signalisation ferroviaire ;
→ Les systèmes de télésurveillance et de sûreté, ainsi que les détecteurs ferroviaires en voie.

L'ensemble de ces métiers a été intégré, toutes entreprises confondues, au sein d'un même pilotage, afin d'assurer en particulier l'intégration de ces systèmes jusqu'aux essais de montées en vitesses. Cela est passé par le pilotage fin des interfaces : des études de synthèse multi-métiers en phase études d'exécution, le suivi de fiches d'interfaces, la gestion de configuration à chaque étape du projet, et surtout la réalisation des essais d'intégration. ▷



3a

3a & 3b- Illustration et légendes des équipements ferroviaires.

3a & 3b- Illustration and captions of rail equipment.

L'ÉNERGIE

L'alimentation des trains sur la LGV est en 25 000 V, en courant alternatif. Ainsi, la conception des alimentations dites "de traction" est basée en 2x25 kV sur l'ensemble du tracé, à l'exception du réseau classique de Connerré fret en 1500 V continu.

Deux sous-stations nouvelles ont été construites. La sous-station du Pertre (Ille-et-Vilaine) pour alimenter le secteur entre Rennes et Laval-Est, et celle de Juigné-sur-Sarthe (Sarthe) pour le secteur entre Laval-Est et La-Millesse. Les sous-stations d'extrémité étant celles déjà existantes : Le Parc pour Connerré, et celle de Cesson-Sévigné pour Rennes. La sous-station du Parc alimente les 25 km du contournement nord du Mans.

Ces sous-stations ont été dimensionnées pour faire face aux augmentations de trafic dans les années à venir et aux situations dégradées. Ainsi la sous-station du Pertre est équipée de 3 transformateurs. La sous-station de Juigné-sur-Sarthe est alimentée en 400 kV et située directement dans le poste RTE existant, avec 2 transformateurs de 90 MVA pour délivrer les 25 kV nécessaires à la caténaire. Cette sous-station

ÉQUIPEMENTS FERROVIAIRES

<p>EFO1 ÉLECTRIFICATION</p> <p>ALIMENTER LA LIGNE À GRANDE VITESSE EN 25 KV</p> <p>1.A SOUS-STATIONS</p> <p>ELLES SONT ALIMENTÉES EN ÉNERGIE À PARTIR DU RÉSEAU DE TRANSPORT ÉLECTRIQUE (NOTÉ D'UNE TENSION COMPRISE ENTRE 220 ET 400 KV ET CARACTÉRISÉ À 50-60 HZ) POUR ALIMENTER LES TRAINS SUR LA CATÉNAIRE.</p> <p>2 SOUS-STATIONS À 1 POSTE D'ALIMENTATION</p> <p>LES 2 SOUS-STATIONS ALIMENTENT CHACUNE DEUX BRAS ENTRAVERS.</p> <p>1.B POSTES P ET SP</p> <p>ILS SONT ÉQUIPÉS D'UN TRANSFORMATEUR QUI PERMETTENT DE RÉGULER LA TENSION POUR GARANTIR LA CIRCULATION DU TRAIN SANS ACCIDENTS ET ASSURER LES PERFORMANCES DE TRAFIC DE LA LIGNE.</p> <p>11 POSTES P + 1 POSTES SP</p> <p>ILS SONT SITUÉS TOUT LE LONG DE LA LIGNE.</p>	<p>2.B FOUILLES CATÉNAIRES</p> <p>LE PONDUS DU CÂBLE EST RÉALISÉ PAR UNE FOUILLE. CELLE DU MARCHÉ DE FONCTIONNEMENT A ÉTÉ PRÉALABLEMENT DÉFINI SUR LE SOL. ELLE PEUT AVOIR UN TONNAGE DE 70 CM DE DIAMÈTRE À 2 MÈTRES DE PROFONDEUR DU MARCHÉ.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p> <p>3.C MATADE CATÉNAIRES</p> <p>LES SUPPORTS CATÉNAIRES SONT MONTÉS GRÂCE À UNE MATADE. C'EST-À-DIRE QUELLES SONT MISES EN POSITION DANS LES TROUS FORÉS ET SONT MONTÉES PAR QUINZE ÉTATS AU SOL.</p> <p>SUPPORTS ENTRE 1 ET 14 MÈTRES DE HAUT</p> <p>3.D RÉGONNAGE CATÉNAIRES</p> <p>LES SUPPORTS SONT RÉGONNÉS DANS LA FOUILLE. UNE FINE SCIE, LES ÉTATS SONT RÉGONNÉS.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>	<p>EFO5 ARTÈRES CÂBLÉES</p> <p>PERMETTRE LE CHEMINEMENT DES CÂBLES OPTIQUES À LONGUE, À LA SIGNALISATION ET AUX TÉLÉCOMMUNICATIONS.</p> <p>1.A FOUILLES ARTÈRES CÂBLÉES</p> <p>ELLES SONT RÉALISÉES À L'AIDE DE TRANCHÉES QUI PERMETTENT D'ENFONCER LE SOL. LES CÂBLES SONT SÉPARÉS DIRECTEMENT DANS LE SOL IDENTIFIÉS, SONT DANS DES CONDUITS.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p> <p>1.B RÉGONNAGE DES CÂBLES</p> <p>L'ENFONCEMENT DES CÂBLES EST RÉALISÉ SUR DES CARRIAGES QUI SONT ENFONCÉS DANS LE SOL GRÂCE À DES LAMINES DÉFORMABLES.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>
<p>EFO2 ALIMENTATION DES BÂTIMENTS</p> <p>ALIMENTER EN COURANT ÉLECTRIQUE L'ENSEMBLE DES BÂTIMENTS ET DES BÂTIMENTS SITUÉS LE LONG DE LA LIGNE POUR DIFFÉRENTS SERVICES (ALIMENTATION CATÉNAIRE, FRET, ...)</p> <p>2.A BÂTIMENTS TECHNIQUES GÉNÉRAUX</p> <p>ILS SONT ÉQUIPÉS D'UN COMPTEUR DE TOUTES LES ANNÉES ANNUELLES. ILS FOURNISSENT DE L'ÉNERGIE AUX ÉQUIPEMENTS DE SIGNALISATION ET DE TÉLÉCOMMUNICATIONS.</p> <p>BÂTIMENTS TECHNIQUES</p> <p>2.B ENTRES-AL</p> <p>LES ENTRES-AL SONT DES BÂTIMENTS ÉQUIPÉS DE TRANSFORMATEURS. ILS SONT POUR FONCTIONNER LE RÉCHAUFFAGE DES AGRIÈRES ET VENTILATION AUX BÂTIMENTS GÉNÉRAUX.</p> <p>ENTRES-AL À 100</p>	<p>3.E RÉGONNAGE FEEDER ET COPA</p> <p>LE CONDUCTEUR DE PROTECTION AÉRIEN (CPA) EST DÉMONTÉ ET RÊTÉ AU POSTE. LE FEEDER NÉCESSAIRE À L'ALIMENTATION DES POSTES P ET SP EST ÉGALEMENT DÉMONTÉ EN TÊTE DE POSTE.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p> <p>3.F RÉGONNAGE CÂBLE PORTEUR</p> <p>UN FOUS LA VIRE FERMÉE EN POSITION, LE CÂBLE PORTEUR EST MIS EN PLACE. IL SUPPORTE LE PENDULE DU SUPPORT. LE MÊME LE FIL DE CONTACT. LE BÂTIMENT SERA EN CONTACT AVEC LE PENDULE DU TRAIN ET LA FOURNIRA L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>	<p>EFO6 SIGNALISATION</p> <p>FOURNIR LES INFORMATIONS DU TRAIN, DE LA VIE ET DE L'ENVIRONNEMENT POUR PERMETTRE LA CIRCULATION EN SÉCURITÉ DES TRAINS.</p> <p>1.A LAMPES</p> <p>LE DISPOSITIF D'IDENTIFICATION DE TRAVAIL DE ZONE DÉFINIT QUELQUE CHOSE PERMET LA TRAVAIL DE LA VIE FERMÉE À MOINS EN TOUTE SÉCURITÉ. UN DISPOSITIF EST PRÉSENT EN PART ET D'UN TOUT DE LA LIGNE.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p> <p>1.B ALONS</p> <p>LA LIGNE EN EST DÉFINIE EN COURANT. DES ALONS SPÉCIFIQUES DU SÉCURITÉ COMMENCENT DÉFINIT LES ZONES NÉCESSAIRES À LA RÉGULATION DU TRAFIC.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>
<p>2.C CLAIRAGES ET PRISES DE COURANT</p> <p>ILS SONT RÉALISÉS À L'AIDE DE LAMPES À HAUTE TENSION ET ASSURENT UNE BONNE VISIBILITÉ AU MARCHÉ EN CAS DE NEIGE OU DE VENTILATION DES DISPOSITIFS.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>	<p>EFO4 TÉLÉCOMMUNICATIONS</p> <p>PERMETTRE LES COMMUNICATIONS À HAUT DÉBIT ET SÉCURITÉ ENTRE LES BÂTIMENTS TECHNIQUES ET DE MARCHÉ ENTRE LES TRAINS.</p> <p>1.A SITES GSM-R</p> <p>LES SITES GSM-R PERMETTENT DE COUVRIR LA LIGNE EN TOUTE SÉCURITÉ. LA PRISE OPTIQUE EST À MOINS DE 100 MÈTRES DES SITES ET DE 10 MÈTRES ENTRE LES INSTALLATIONS DE LA LIGNE ET DE TOUTES, NOTAMMENT POUR LA SIGNALISATION EXTÉRIÈRE.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>	<p>1.C CIRCUITS DE VIE</p> <p>DISPOSITIFS INSTALLÉS SUR LA VIE PERMETTENT DE DÉTECTER LA PRÉSENCE D'UN TRAIN SUR UNE ZONE.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>
<p>EFO3 CATÉNAIRES</p> <p>FOURNIR L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE AU TRAIN GRÂCE À UN FIL DE CONTACT TENDU AU-DESSUS DE LA VIE.</p> <p>1.A TOPOGRAPHIE</p> <p>UN PRÉ-PROJET EST RÉALISÉ AFIN DE MARCHÉ LES EMPLACEMENTS DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS (PENDULE, MARCHÉ CÂBLÉ, FILS DE CONTACT) POUR RÉPARER. DES MARCHÉS SONT MONTÉS AFIN D'INDIQUER LES POINTS D'EMPLACEMENT.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>	<p>1.B BRIDAGE ET RACCORDEMENT FIBRES OPTIQUES</p> <p>LA FIBRE OPTIQUE PERMET LES ÉCHANGES ENTRE LES BÂTIMENTS TECHNIQUES, LES BÂTIMENTS D'ENTRÉE ET LES SITES DE COMMUNICATION. LA FIBRE OPTIQUE EST À MOINS DE 100 MÈTRES DES SITES OPTIQUES. UN BRIDAGE À MOINS DE 100 MÈTRES DES SITES OPTIQUES. UN BRIDAGE À MOINS DE 100 MÈTRES DES SITES OPTIQUES.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>	<p>EFO7 SÛRETÉ</p> <p>SÛRTELLER LES INSTALLATIONS DE LA LIGNE ET TRANSMETTRE LES ALARMES AU MARCHÉ.</p> <p>1.A CONTRÔLE D'ACCÈS</p> <p>DES CAMÉRALES DE SÛRETÉ ET DES CONTRÔLES D'ACCÈS SONT INSTALLÉS POUR SÛRTELLER LES BÂTIMENTS TECHNIQUES, LES CENTRES DE MARCHÉ ET LE CENTRE OPÉRATIONNEL.</p> <p>EXÉCUTION À L'ÉNERGIE PAR JOUR</p>

3b

© EIFFAGE ÉNERGIE SYSTEMES



© GAËL ARNAUD POUR EIFFAGE RAIL EXPRESS

4

n'est pas localisée directement le long des voies principales de la LGV, mais, au niveau des raccordements. Afin de fournir une puissance nécessaire sur la ligne principale, il a donc été nécessaire de créer un poste d'injection sur la ligne à 5 km de la sous-station. L'énergie est ainsi transportée via une ligne bifilaire aérienne.

La sous-station du Pertre est située à proximité de la ligne et donc connectée directement à la caténaire pour fournir les 25 kV nécessaires. Cet ouvrage est alimenté en 220 kV depuis un poste RTE existant, via une double liaison enterrée et équipée de 3 transformateurs 65 MVA (figures 4 et 5).

Afin de relever la tension en ligne pour garantir la puissance nécessaire lors de la circulation des trains, 15 postes électriques le long des voies sont déployés, avec 2 autotransformateurs de 10 ou

15 MVA (figure 6). Ces postes sont alimentés par le *feeder* de la caténaire directement par les sous-stations et réinjectent ainsi le courant sur la caténaire. Un système de contrôle-commande a été développé par les équipes d'Eiffage Énergie Systèmes avec un haut niveau de disponibilité et un niveau de sécurité SIL2. Ce dernier permet ainsi au poste

4 & 5- Sous-station Le-Pertre.
6- Poste P à Loiron (53).

4 & 5- Le-Pertre substation.
6- Substation P in Loiron.

de commande de la ligne, le Central Sous-Station de Rennes, réalisé et exploité par SNCF Réseau de commander l'ensemble des installations de traction de la ligne.

LES ALIMENTATIONS AUXILIAIRES

Pour assurer la circulation des trains à grande vitesse en toute sécurité, des milliers de capteurs et équipements sont installés sur les voies, sur les ouvrages, et dans des bâtiments techniques.

Une cinquantaine de locaux techniques sont ainsi présents le long des voies abritant des équipements de contrôle et de commande ainsi que de télécommunication. En particulier, 18 bâtiments techniques abritent les systèmes de signalisation. Trois sources d'alimentation basse tension permettent de sécu-

riser ces locaux : une source à travers un local de transformateur alimenté directement par la caténaire, une via le réseau ErDF, et en secours, la possibilité de brancher un groupe électrogène mobile. Le local énergie des postes de signalisation est composé d'un tableau général basse-tension, d'onduleurs et de batteries afin de fournir de l'énergie in-interruptible aux équipements de signalisation et de télécommunication. En ligne, c'est près de 520 dispositifs d'éclairages et 200 prises de courants qui permettent aux opérateurs de maintenance d'intervenir de nuit en toute sécurité.

LA CATÉNAIRE

Les trains sont alimentés à travers leur pantographe par la caténaire en 25000 V (figure 7). Afin de garantir les meilleures performances jusqu'à des vitesses de 350 km/h, le choix a été fait de partir sur une conception caténaire LGV SNCF, fort de la longue expérience de conception. Ainsi la caténaire dite V350 STI, a été déployée sur la ligne. Grâce à un travail collaboratif entre SNCF Ingénierie & Projet, département Traction, et celle d'Eiffage Énergie Système, différentes évolutions techniques ont été apportées pour la LGV BPL :

UTILISATION D'ISOLATEURS COMPOSITES

Ses isolateurs d'armements caténaires sont en matériau composite et non en verre ou céramique comme cela était le cas pour les premières LGV.

Les avantages principaux étant que ces isolateurs, moins fragiles, peuvent être manipulés, stockés et transportés avec un minimum de contraintes et un risque limité de détérioration. La maintenance est également facilitée car ils ne nécessitent pas de nettoyage à l'eau sous pression. ▶



© GAËL ARNAUD POUR EIFFAGE RAIL EXPRESS

5



6



7

© GAËL ARNAUD POUR EIFFAGE RAIL EXPRESS

FEEDER EN TÊTE DE SUPPORT

Le *feeder* dit "négatif" était jusque-là toujours positionné côté champ via un isolateur suspendu. Afin de faciliter le montage en phase chantier et limiter le nombre de pièces, la solution a été trouvée avec l'utilisation du montage d'un isolateur en tête des supports, comme on peut le voir sur certains réseaux européens comme en Allemagne.

CONTREPOIDS MONOBLOC BÉTON

Pour remplacer le système de contre-poids en galette de fonte assemblée, un contre-poids monobloc en béton a été développé. Ce dernier permet désormais une meilleure précision dans la tension mécanique de régularisation des conducteurs, de réduire les risques de vol, et surtout une réduction du temps d'installation et moins accidentogène.

LA TÉLÉCOMMUNICATION : L'ÉPINE DORSALE DE LA LGV

Les systèmes de télécommunication sont nécessaires pour permettre d'échanger les différentes données d'exploitation et de maintenance avec le plus haut niveau de fiabilité et de sécurité.

La LGV BPL est intégrée au réseau national, en particulier à travers les postes de contrôles (PCD/CSS) de SNCF Réseau à Rennes pilotant les équipements de la ligne, et également par son système radio GSM-R

connecté au système national basé à Paris.

Des fibres optiques couvrent ainsi l'ensemble du tracé pour raccorder les bâtiments techniques, et interfacées avec SNCF Réseau. Une architecture

7- Caténaire.
8- GSM-R.

7- Catenary system.
8- GSM-R.

a ainsi été déployée spécifiquement sur BPL :

- Hautement disponible et résiliente, afin de faire face à minima à tout cas de panne simple ;
- Pleine compatible et intégrée au réseau de SNCF Réseau ;
- Compatible avec l'ensemble des interfaces des sous-systèmes raccordés au réseau ;
- Pérenne et évolutive, permettant au mainteneur OPERE de suivre les futures évolutions technologiques ;
- Permet une supervision précise des services, et pas uniquement des liens pour une évaluation rapide par le mainteneur de l'ensemble des systèmes de la ligne.

La ligne est également couverte par un système radio spécifique au chemin de fer et interopérable au niveau européen : le GSM-R (figure 8).

C'est ainsi que 26 sites ont été construits afin d'assurer une couverture hautement disponible pour permettre l'échange de la voix (conducteurs/opérateurs/exploitants), et les données (communication train/sol pour l'ERTMS N2). Ce système étant intégré au réseau national GSM-R, et désormais exploité et maintenu au niveau national.

Des postes téléphoniques le long des voies (en GSM-R ou fibre optique) permettent également de communiquer avec les postes de commande (PCD/CSS) rapidement en cas de problème (réservé aux conducteurs ou mainteneurs de la ligne).



8

© GAËL ARNAUD POUR EIFFAGE RAIL EXPRESS

**9a & 9b-
Signalisation
ferroviaire.**

**9a & 9b-
Rail signalling.**

LA SIGNALISATION

Ce sont 3 systèmes de signalisation qui équipent la LGV afin de répondre aux contraintes d'exploitation fixées dans le cahier des charges.

Tout d'abord, cette nouvelle ligne appartenant au réseau transeuropéen de lignes à grandes vitesses, les installations doivent permettre l'interopérabilité du matériel roulant au niveau européen.

Ainsi, le système européen de signalisation l'ERTMS niveau 2 couvre l'ensemble de la LGV emprunté par les trains de voyageurs. Grâce aux performances de l'ERTMS, l'espace-ment entre 2 trains à 320 km/h est de 2 minutes 45 secondes.

Néanmoins, la LGV étant une continuité de l'historique LGV Atlantique (Paris-Le Mans), il fallait déployer un système national pouvant être "lu" par le matériel existant (rames Atlantiques), équipés de TVM300 ou de TVM430 (système de signalisation historique en France pour la grande vitesse).

Un développement avec l'industriel Ansaldo STS a ainsi été mené pour adapté en ce sens l'architecture du système TVM.

Enfin, la section Nord du Mans, circulée exclusivement de trains frets, est équipée du système ERTMS niveau 1 (les trains de fret devant être équipés de ce système interopérable).

La ligne est banalisée, c'est-à-dire que les systèmes de signalisation permettent aux trains de circuler sur chaque voie en sens contraire au sens normal d'exploitation à la vitesse de 320 km/h ; utile dans le cas de mode dégradé sur la LGV.

18 bâtiments techniques le long de la ligne ainsi que le centre technique de la base de maintenance abritent les systèmes informatiques de signalisation : Pour la TVM, les SEI-TVM300 contrôlant des portions de voie d'une dizaine de km, équipées de circuits de voie (détection des trains et communication par les rails), de moteurs et contrôleurs d'aiguillage (changement de voie), et autres détecteurs pour la sécurité de la circulation (boîtes chaudes, chutes de véhicules, vents latéraux).



9a



9b

© GAËL ARNAUD POUR EIFFAGE RAIL EXPRESS

Pour l'ERTMS N2, ce sont les RBC (Radio Block Center) qui supervisent l'ensemble de la ligne grâce à la couverture radio GSM-R (position du train, envoi des autorisations, alarmes, etc.). Pour l'ERTMS N1, au nord du Mans, ce sont des Eurobalises entre les rails qui envoient ponctuellement les messages d'autorisation au train via des armoires en voie (LEU) reliées aux postes techniques.

Des détecteurs sur la plateforme ferroviaire viennent ajouter un complément de sécurité pour la circulation des trains :

→ Les détecteurs de boîtes chaudes (DBC) : préviennent de la surchauffe des essieux des trains. Comme cela est le cas sur l'ensemble du réseau national, ils permettent automatiquement d'agir sur le système de signalisation à bord du train, soit par un arrêt en freinage de service et la limitation de vitesse de 80 km/h sur la voie contiguë pour les trains croiseurs.

→ Les détecteurs de chute de véhicule (DCV) : Installés sur 18 ponts route (PRO) et 4 tranchées couvertes, ils assurent l'arrêt automatique des trains en amont en cas de déclenchement suite à la détection de la chute d'un véhicule ou équivalent.

→ Les détecteurs de vents latéraux (DVL) : Installés sur 10 sites répartis le long de la ligne donnant des alarmes correspondant à la mise en place automatique de limitation de vitesse (230 km/h, 170 km/h et 80 km/h), en cas de grands vents sur des portions jugées critiques, et éviter ainsi le potentiel déraillement du train en cas de vents latéraux très importants.

D'autres détecteurs, n'agissant pas automatiquement sur la signalisation, sont également installés, afin de faciliter l'exploitation de la ligne et la rendre la plus disponible possible : des détecteurs de givre (réchauffage éventuel des aiguilles ou de la caténaire), des détecteurs de comportement du pantographe (prévention des potentiels pantographes dégradés des trains qui pourraient impacter la caténaire), des systèmes anti-intrusion et de sûreté sur l'ensemble de la ligne (caméras, contrôle d'accès, etc.).

L'ensemble des équipements de signalisation sont exploités par SNCF Réseau, au poste de contrôle de Rennes "le PCD" afin d'assurer la circulation des trains en toutes circonstances (figures 1, 9a et 9b).

LE COBPL : LE POSTE DE CONTRÔLE DU MAINTENEUR

L'exploitation de la ligne, au sens circulation, est assurée par les opérateurs de SNCF Réseau, en tant qu'exploitant, et ce depuis le PCD et le CSS de Rennes. Le partenariat public-privé implique des objectifs et des performances de maintenance précis (temps de relève d'un incident, disponibilité des installations, etc.). Dès le début du projet, les équipes de conception se sont ainsi penchées avec le mainteneur Eiffage "OPERE", sur la conception et la construction d'un centre de supervision capable de visualiser l'ensemble des équipements de la ligne en temps réel : c'est le COBPL (figure 10). Il est basé sur la base de maintenance de Saint-Berthevin en Mayenne. Ainsi un système de télésurveillance a été développé et déployé par les équipes d'Eiffage Énergie Systèmes, capable à la fois de synthétiser et prioriser les alarmes et défauts pour les opérateurs du COBPL. L'ensemble des informations de diagnostics des équipements des 52 locaux techniques de la ligne est ainsi centralisé, soit environ 50 000 données traitées (la traction électrique, la surveillance des aiguilles, la signalisation, les alarmes techniques des bâtiments, le réseau de télécommunication, etc.). □



10- COBPL - centre de supervision de la maintenance de la LGV BPL.

10- COBPL - BPL HSL maintenance supervision centre.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Eiffage Rail Express (pour la LGV)
- MAÎTRE D'OUVRAGE :** SNCF Réseau (pour les jonctions et le PCD/RFN)
- MAÎTRE D'ŒUVRE :** Groupement Setec/Ingerop/Eiffage Infrastructure/Eiffage Énergie Systèmes
- GROUPEMENT DE CONCEPTION-CONSTRUCTION :** Clere (Eiffage Infrastructure/Eiffage Énergie Systèmes)
- PARTENAIRE DU SYSTÈME DE SIGNALISATION :** Ansaldo Sts

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 45 millions de m³ tassés (remblais/déblais)
- 1,6 million de tonnes de ballast
- 680 000 traverses monobloc des rails
- 230 ponts routes ou ponts rails
- 261 ouvrages hydrauliques
- 11 viaducs
- 7 tranchées couvertes
- 2 bases de maintenance
- 26 sites GSM-R
- 9 000 poteaux caténaires
- 2 200 ha d'emprise ferroviaire
- 50 000 ha d'aménagements fonciers
- Près de 1 000 ha de mesures compensatoires environnementales
- 1 450 emplois locaux en phase chantier
- Plus de 700 M€ de retombées économiques locales et de sous-traitance en phase travaux
- 20 ans de projet (depuis les premières études) et un coût de 3,4 M€

ABSTRACT

BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE (BPL) HIGH-SPEED RAIL LINE

SIDOINE SERRAJ, EIFFAGE ÉNERGIE SYSTÈMES FERROVIAIRES

The BPL High-Speed Rail Line comprises 214 km of new double-track line between Connerré and Rennes, including 32 km of couplings built on the 8 junctions of the conventional network, 25 km of mixed traffic and 3.6 km of new line for the Sablé-sur-Sarthe connecting track. With a commercial speed of 320 km/h, it links Paris and Rennes in 1 hour 26 min., representing a time saving of 37 min. This €3.4m project was carried out between July 2011 and May 2017, under a public-private partnership contract between SNCF Réseau and Eiffage Rail Express. The start of commercial operation was authorised on 15 May 2017. From the power equipment to signalling systems, including remote surveillance and communication systems, this project covers the various rail equipment sectors which allow trains to run safely on a high-performance line. □

LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE

SIDOINE SERRAJ, EIFFAGE ÉNERGIE SYSTÈMES FERROVIAIRES

La línea de alta velocidad Breaña-País del Loira consta de 214 km de línea nueva de doble vía entre Connerré y Rennes, 32 km de la cual corresponde a conexiones construidas en los 8 nodos de red clásica, 25 km de tráfico mixto y 3,6 km de nueva línea para la conexión de Sablé-sur-Sarthe. Con una velocidad comercial de 320 km/h, permite viajar de París a Rennes en 1h26, lo que supone un ahorro de tiempo de 37 min. Esta obra de 3,4 M€ fue realizada entre julio de 2011 y mayo de 2017 mediante un consorcio público-privado entre SNCF Réseau y Eiffage Rail Express. La entrada en servicio comercial se autorizó el 15 de mayo de 2017. De los equipos de energía a los sistemas de señalización, pasando por los sistemas de televigilancia y comunicación, este proyecto integra los distintos ámbitos de los "equipamientos ferroviarios" que permiten la circulación segura de los trenes en una línea eficiente. □



1

© RAZEL-BEC

CONCEPTION ET CONSTRUCTION DE L'INSTALLATION NUCLÉAIRE ICEDA DU BUGEY (AIN)

AUTEUR : NICOLAS NAULET, DIRECTEUR DU PROJET, RAZEL-BEC

L'INSTALLATION DE CONDITIONNEMENT ET D'ENTREPOSAGE DE DÉCHETS ACTIVÉS (ICEDA), CONSTRUITE SUR LE SITE DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DU BUGEY (AIN), SUIT ACTUELLEMENT UN PROGRAMME D'ESSAI DEVANT PERMETTRE SA MISE EN SERVICE D'ICI LA FIN DE L'ANNÉE 2019. CETTE INSTALLATION NUCLÉAIRE RÉALISÉE DANS LE CADRE D'UN MARCHÉ DE CONCEPTION CONSTRUCTION PILOTÉ PAR RAZEL-BEC POUR LE COMPTE D'EDF SERA EN MESURE DÈS 2020 DE CONDITIONNER PUIS D'ENTREPOSER DES DÉCHETS DE MOYENNE ACTIVITÉ À VIE LONGUE ISSUS DE L'EXPLOITATION ET DU DÉMANTÈLEMENT DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

L'I.C.E.D.A (figure 1)

ICEDA est une installation implantée sur le site de la centrale nucléaire du Bugey dans l'Ain, qui permettra de réceptionner, de conditionner et d'entreposer les déchets Moyenne Activité Vie Longue en attente d'être évacués vers le stockage définitif de l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs). Ces déchets sont issus de

la déconstruction des 9 réacteurs EDF de première génération en cours de démantèlement ainsi que de l'exploitation de réacteurs à eau pressurisée

1- Bâtiment ICEDA terminé.

1- Completed ICEDA building.

du parc EDF. L'ICEDA a également une fonction d'Installation de Découplage et de Transit pour les colis de déchets issus du démantèlement du réacteur graphite gaz Bugey 1.

L'ICEDA accueillera des emballages de transport contenant les déchets à traiter. Ces emballages sont conçus pour bloquer le rayonnement émis par les déchets durant leur transport depuis les sites producteurs jusqu'à l'ICEDA.

Les déchets sont extraits de leurs emballages puis conditionnés dans des cellules blindées en colis bétonnés dénommés colis C1PG. Ces colis sont constitués d'une coque cylindrique en béton préfabriquée dans lesquels les déchets sont bloqués en plusieurs étapes par des matrices cimentaires. Ces colis sont ensuite entreposés dans deux halls capables de recevoir chacun un millier de colis.

Les déchets conditionnés et entreposés seront à terme transférés dans le futur centre de stockage des déchets de haute et moyenne activités à vie longue de l'ANDRA.

Les déchets conditionnés sur ICEDA sont de deux types :

→ Des déchets de déconstruction dits "courts". Ces déchets sont reçus en paniers placés dans un emballage de transport de type R73. Le panier est extrait de l'emballage de transport pour être directement mis en œuvre dans une coque béton. 5 colis de ce type peuvent être traités par semaine sur ICEDA (figure 2).

→ Des déchets d'exploitation dits "longs". Ces déchets sont reçus en étuis placés dans un emballage de type TN dont la masse atteint 130 t. Les étuis sont extraits de l'emballage de transport. Les déchets sont ensuite extraits des étuis puis découpés pour être mis en œuvre dans une coque béton. L'ICEDA est conçue pour traiter 1 TN de ce type par mois (figure 3).

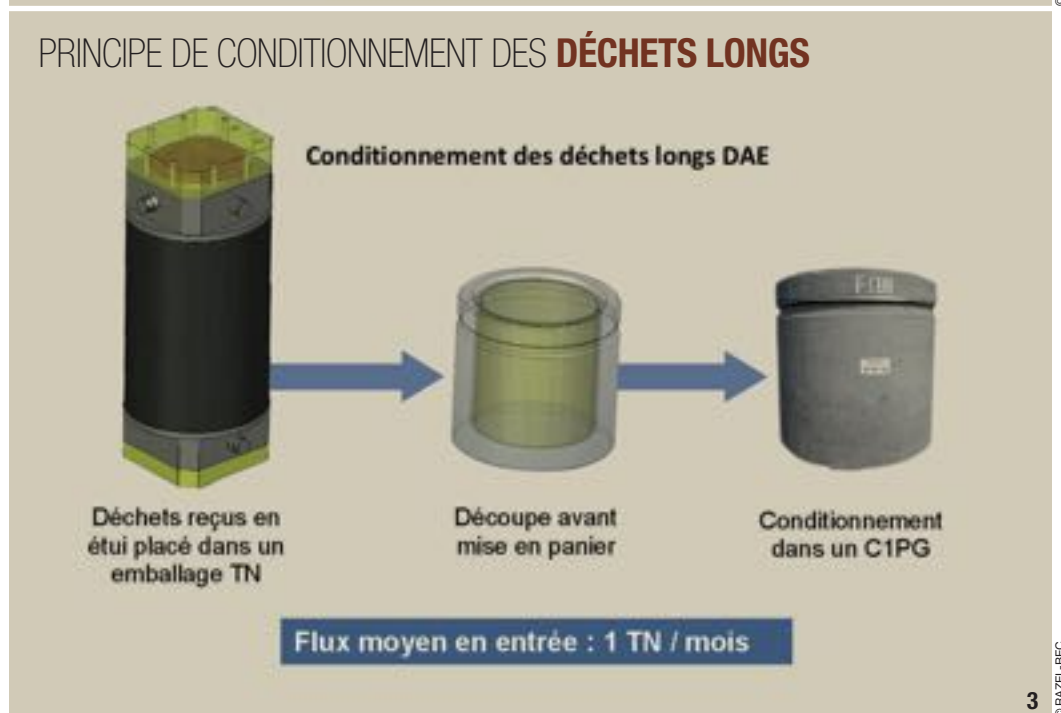
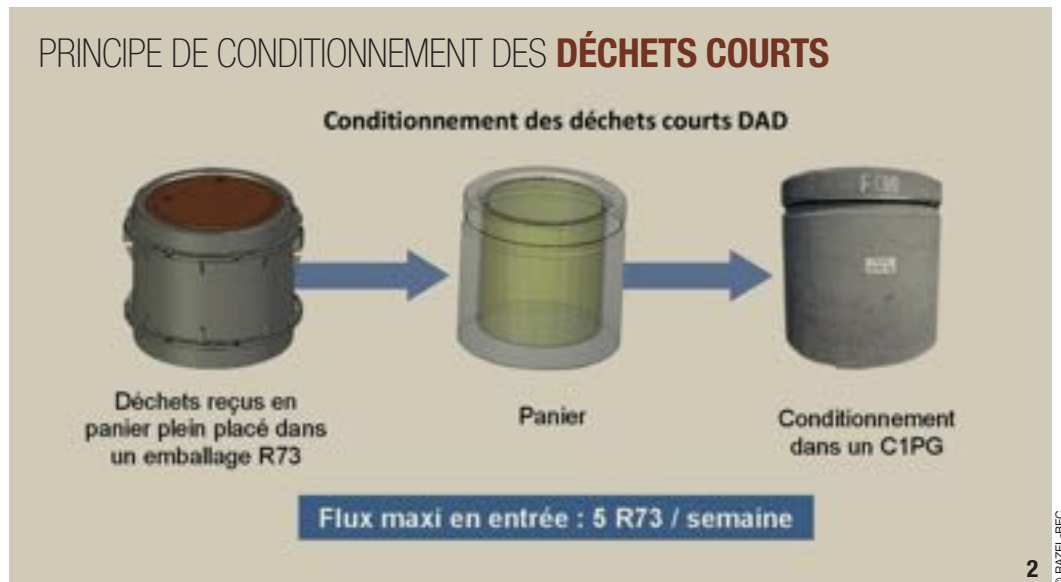
L'ICEDA est conçue en six blocs de bâtiments indépendants à ossature en béton armé, chaque bâtiment étant séparé de ceux adjacents par un joint de dilatation de 15 cm (figure 4).

Les déchets arrivent dans le hall de réception (figure 5), ils sont conditionnés dans les trois cellules chaudes implantées dans le bloc process puis entreposés dans les deux halls d'entreposage. À ces trois principaux bâtiments s'ajoutent le bloc bureau dans lequel est installée la salle de commande, le bloc de traitement des effluents et un bloc technique qui renferme en particulier l'installation de fabrication des matrices cimentaires pour la confection des colis.

LE GROUPEMENT CONCEPTEUR - CONSTRUCTEUR

Pour la conception et la construction de cette installation complexe un Groupement Momentané d'Entreprises (nommé GME dans la suite) dont Razel-Bec est le mandataire a été constitué pour rassembler l'ensemble des compétences requises.

Razel-Bec réalise le gros œuvre et le second œuvre de l'installation. Elle fournit également deux composants du process de conditionnement : la station de traitement des effluents liquides radioactifs et les unités de fabrication des matrices cimentaires nécessaires au conditionnement des déchets décrite plus bas.



Ingerop assure la mission d'ingénierie et de pilote en phase conception. Il assure en outre la conception du génie civil de l'installation, de la station de traitement des effluents liquides, de la surveillance radiologique et de la gestion du risque incendie. Bilfinger Noell assure la conception et la réalisation de l'ensemble du process de conditionnement des déchets en cellules (extraction des déchets des emballages, découpes des déchets et blocage des déchets dans les coques béton). L'ensemble des opérations en cellules est réalisé par moyens téléopérés (bras télémanipulateurs, commandes déportées, ...), aucune intervention humaine en cellule n'étant possible (figure 6).

2- Principe de conditionnement des déchets courts.

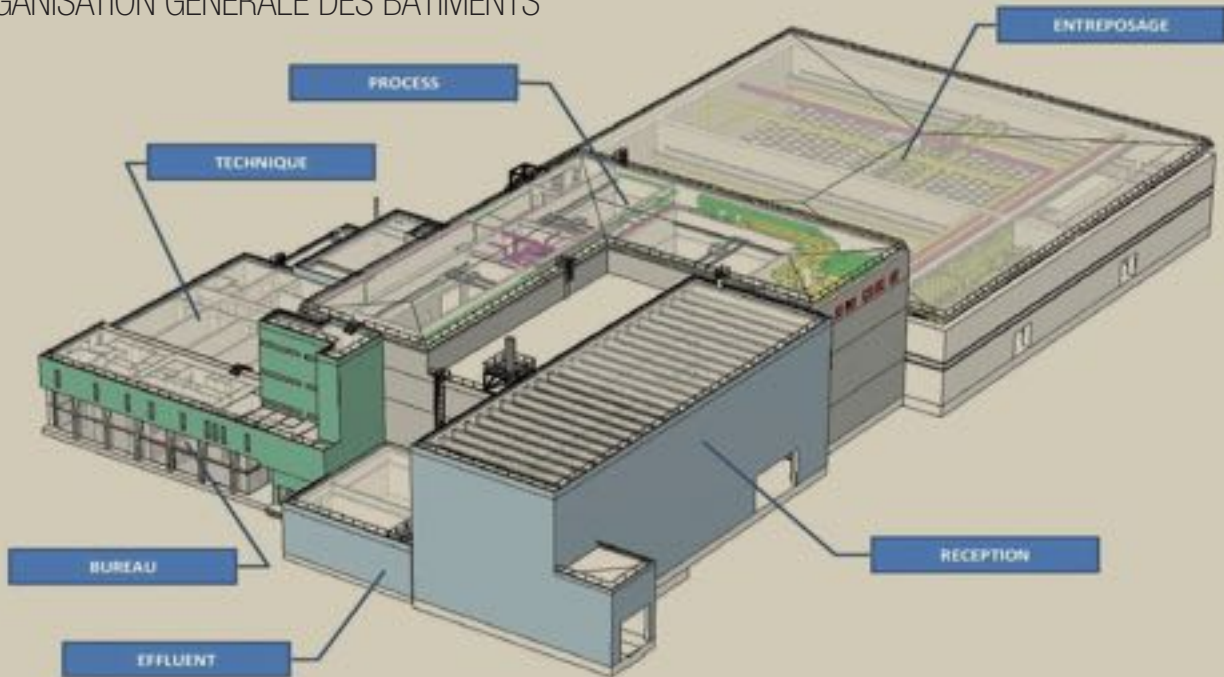
3- Principe de conditionnement des déchets longs.

2- Schematic of short-lived waste conditioning.

3- Schematic of long-lived waste conditioning.

Cegelec Cem assure la conception et la réalisation des équipements nécessaires à la manutention des emballages de transport dans le hall de réception d'une part et dans le hall d'entreposage d'autre part. Les ponts installés dans les halls d'entreposage fonctionnent de manière automatisée sur la base d'une cartographie de stockage des colis. Bouygues Construction Services Nucléaires assure la conception et la réalisation des systèmes de ventilation dont les principaux objectifs sont d'une part de maintenir les cellules chaudes en dépression pour éviter toute dispersion de matière radioactive vers l'extérieur et d'autre part d'assurer une consigne de température dans les cellules dans lesquelles sont réalisés

ORGANISATION GÉNÉRALE DES BÂTIMENTS



© INGEROP
4

les colis béton pour garantir la qualité à long terme des matrices cimentaires qui les composent.

Omexom assure la conception et la réalisation de l'alimentation électrique des différents systèmes et des systèmes de contrôle commande de l'installation. Ces systèmes comprennent en particulier un outil (OTC) qui assure la traçabilité de la fabrication des colis de déchets à partir des informations saisies par les opérateurs ou transmises par les différents systèmes élémentaires (nature des déchets, suivi de la fabrication des bétons et coulis et de leur conditions de mise en œuvre)

4- Organisation générale des bâtiments.

5- Hall de réception.

6- Cellule de conditionnement des déchets.

4- General organisation of the buildings. 5- Receiving bay.

6- Waste conditioning unit.

et la cartographie en temps réel des déchets dans l'installation pour s'assurer que leur quantité dans chaque zone ne dépasse pas la plage de fonctionnement définie pour l'installation.

En phase construction, Razel-Bec assure le pilotage technique du Groupement.

LES SPÉCIFICITÉS DU GROS ŒUVRE DE L'INSTALLATION

Destinée à conditionner et à entreposer des déchets activés issus de l'industrie nucléaire, l'ICEDA est classée Installation Nucléaire de Base au même titre qu'un réacteur électronucléaire.

La conception et la construction d'ICEDA répondent donc aux mêmes standards :

→ Des procédures d'exécution et plans de contrôles éprouvés et rigoureusement respectés pour démontrer l'atteinte des exigences techniques définies, l'ensemble faisant l'objet d'inspections régulières par l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN).

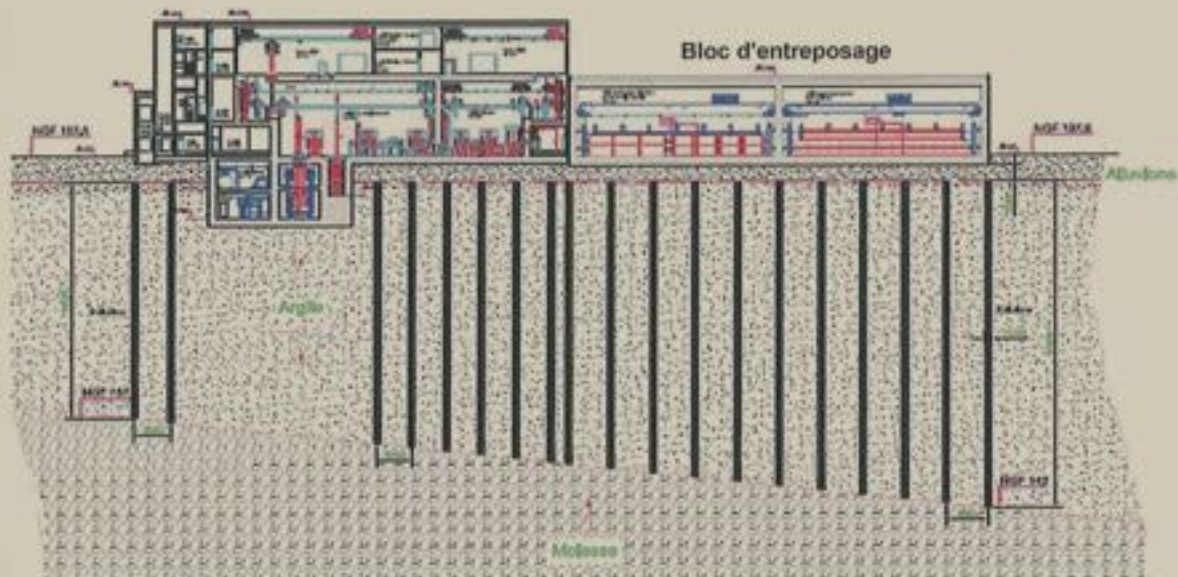
→ Des structures en béton de fortes épaisseurs destinées à bloquer le rayonnement et fortement armées pour répondre aux différents cas de charges en situation normale ou accidentelle.



© RAZEL-BEC
5

6

PRINCIPE DES INCLUSIONS RIGIDES



7

© FAZEL-BEC

LES FONDATIONS DU BÂTIMENT - UNE SOLUTION INNOVANTE DE RENFORCEMENT DE SOL

L'ICEDA repose sur horizon argileux d'épaisseur comprise entre 35 et 55 m. D'une masse totale de 43 000 t à laquelle s'ajoutent 13 000 t de colis, les deux halls d'entreposage exerceront lorsqu'ils seront pleins une contrainte au sol de l'ordre de 15 t/m².

Pour en maîtriser les tassements, Razel-Bec a proposé une solution consistant à renforcer le sol support par des inclusions rigides d'un mètre de diamètre et de 55 m de profondeur selon un maillage carré de 6 m de côté. La plateforme de transfert de charge (PTC) d'une épaisseur de 2 m est constituée d'alluvions compactées surmontée d'un radier en béton armé d'épaisseur 1,50 m (figure 7).

ICEDA est la première installation nucléaire ayant fait appel à cette technique de renforcement de sol par inclusions rigides.

Afin de qualifier cette solution et d'obtenir un avis favorable de l'ASN, un plot d'essai grandeur nature a été réalisé. À l'été 2008, 9 inclusions de 40 m de profondeur et une dalle béton de plus de 100 m² simulant le radier d'ICEDA ont été instrumentées en vue d'enregistrer contraintes et tassements.

Les charges statiques d'ICEDA ont été simulées par un chargement pyramidal constitué de 20 000 m³ de remblai en alluvions du site (figure 8).

Les charges sismiques ont également été simulées.

Les mesures de tassements, qui ont été poursuivies jusqu'à l'été 2009, ont permis de valider l'efficacité de ce système de fondations.

Au stade de la réalisation, d'autres dispositifs d'instrumentation ont été mis en œuvre pour vérifier le comportement du sol renforcé durant les phases de construction de l'ICEDA.

7- Principe des inclusions rigides.
8- Plot d'essai grandeur nature pour la validation des inclusions.

7- Schematic of rigid inclusions.
8- Full-scale test section for validation of the inclusions.

Les paramètres suivants ont été mesurés sur deux zones situées au centre de chacun des deux halls d'entreposage :

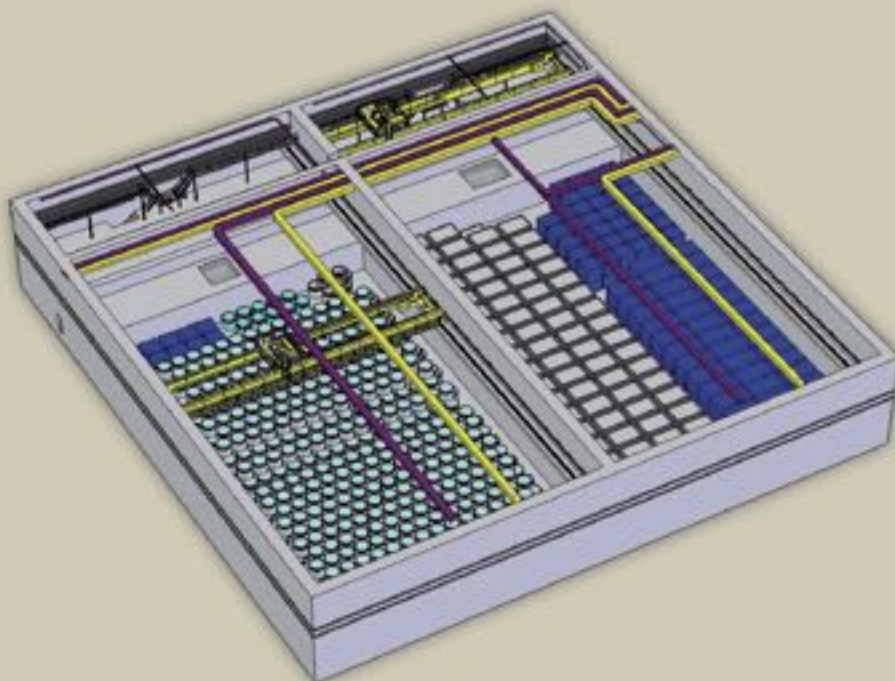
- La déformée des inclusions par des barres instrumentées par cordes vibrantes et noyées dans le béton ;
- Le tassement en tête d'inclusion et le tassement du sol au centre d'une maille par des extensomètres à tige mono-fibre multi-point ;



8

© FAZEL-BEC

MAQUETTE DU BÂTIMENT D'ENTREPOSAGE



LES MÉTHODES DE CONSTRUCTION DE LA DALLE HAUTE DU BÂTIMENT D'ENTREPOSAGE DE FORTE ÉPAISSEUR

La configuration de la dalle de couverture du bâtiment d'entreposage a nécessité des méthodes de réalisation particulières. Le bâtiment d'entreposage est un carré de 60 m de côté avec un voile central délimitant deux halls de 28,50 m de largeur et de 58 m de longueur (figure 9). Les besoins en radioprotection exigent une épaisseur de 1,25 m de béton pour la dalle de couverture.

Les calculs de structure ont montré que la dalle subit une flèche de 11 cm sous charges permanentes nécessitant de mettre en place une contreflèche équivalente lors de sa construction. Il a donc fallu concevoir une méthode de décintrement compatible avec une telle contreflèche.

La dalle de couverture a été construite en 5 plots de largeur allant de 10 à 15 m. Chaque plot constitue donc une dalle continue à deux travées de portée 28 m et d'épaisseur 1,25 m.

La dalle est bétonnée sur un étaielement de pied de type Godon. Quel que soit le phasage de désétaielement, la suppression progressive de cet étaielement de pied entraînerait des reports de charge sur les étaielements restant non dimensionnés pour reprendre ces efforts.

La solution adoptée consiste donc à recouper en deux les travées de 28 m par la mise en œuvre de 8 palées provisoires constituées d'un tube métallique de 800 mm de diamètre et à chaque extrémité d'une semelle d'appui de 30 mm d'épaisseur reposant sur 3 boîtes à sable (figure 10). Lors de la dépose des étaielements de pieds, les efforts de la dalle se reportent sur les voiles périphériques des halls et sur ces palées.

Lorsque les 5 plots de dalle sont coulés et désétayés, on procède alors au dévérinage des palées. Pour ce faire, des vérins sont mis en place entre les boîtes à sable sous chaque palée. Les vérins sont mis en pression pour libérer les boîtes à sable et le dévérinage des 8 palées peut débuter selon un phasage très précis.

Ce phasage résulte d'un calcul aux éléments finis pour s'assurer qu'à tout moment les deux conditions suivantes sont remplies :

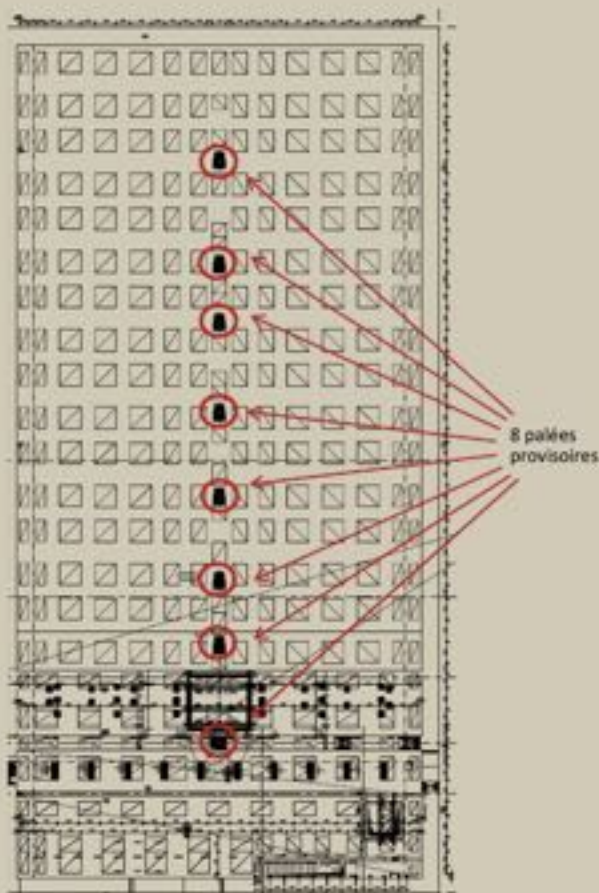
→ Lors du dévérinage d'une palée, les efforts redistribués sur les palées adjacentes ne doivent conduire pour aucune des palées à un dépassement de la capacité de 320 t ;

9- Maquette du bâtiment d'entreposage.

10- Principe de décintrement de la dalle de couverture du hall d'entreposage.

9- Model of the storage building.
10- Schematic showing removal of centring for the storage-bay cover slab.

PRINCIPE DE DÉCINTREMENT DE LA DALLE DE COUVERTURE DU HALL D'ENTREPOSAGE



- La déformée de la plateforme de transfert de charge par des transmetteurs de pression ;
- La pression interstitielle dans l'argile par des capteurs à cordes vibrantes disposés à 4 profondeurs différentes ;
- Les contraintes sous le radier et en tête d'inclusion par des capteurs de pression totale.

La fréquence d'acquisition de ces paramètres était de 4 heures durant les phases de construction du bâtiment. Les mesures réalisées ont confirmé le comportement du sol renforcé prédit au stade de la conception.

11- Maquette de l'unité de fabrication du coulis.

12- Fabrication du mortier de calage.

11- Model of the grout production unit.

12- Production of wedging mortar.

→ Les moments de flexion générés dans la dalle lors du déverinage d'une palée doivent rester admissibles.

Le respect de ces contraintes a conduit à un déverinage des 8 palées en 4 passes successives.

À l'issue de l'opération de décintrement, il subsiste une contreflèche de 2,5 cm sur les 11 cm appliqués conformément aux calculs établis.

L'UNITÉ DE FABRICATION DES COULIS ET BÉTONS POUR LE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS

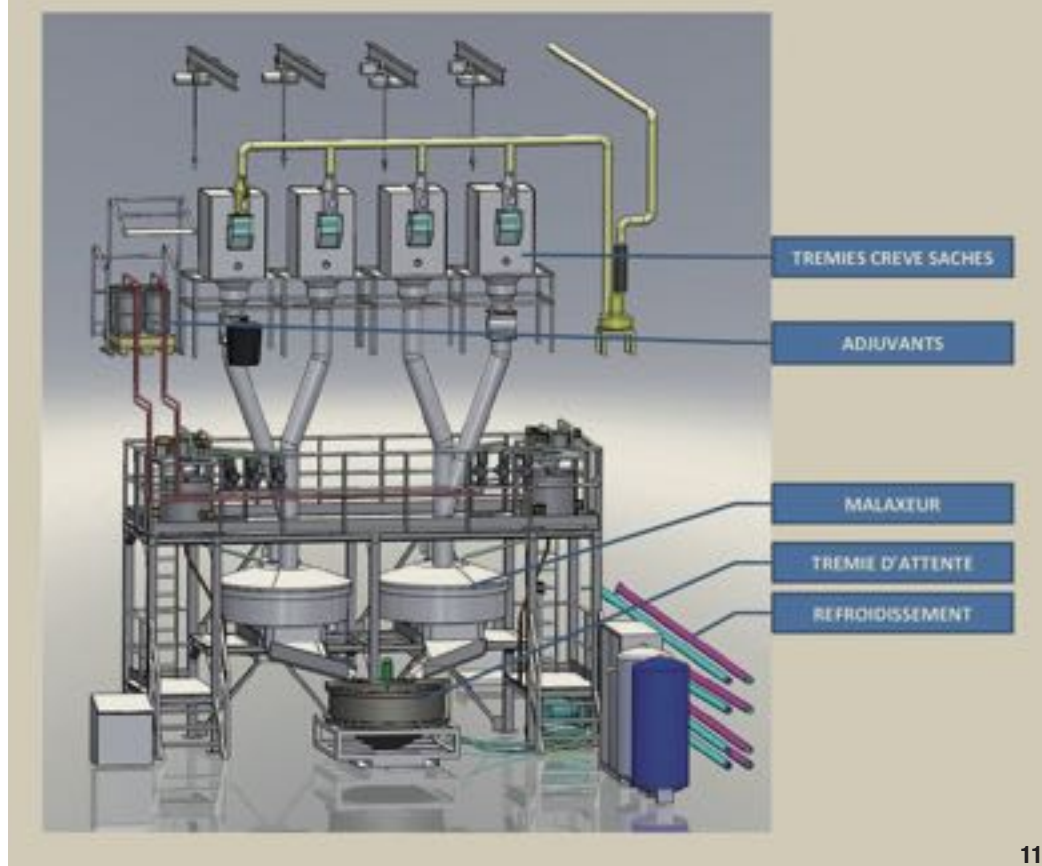
PRÉSENTATION DU PROCESS DE FABRICATION DES COLIS C1PG

Les déchets traités dans l'ICEDA sont conditionnés dans les coques en béton C1PG. Le processus de constitution de ces colis est le suivant :

- 1-** Les déchets, découpés le cas échéant, sont mis en place dans un panier métallique dans la première cellule. Ils sont ensuite transférés dans la deuxième cellule afin d'être bloqués dans le panier par un coulis à base de ciment.
- 2-** Le panier ainsi bloqué est transféré dans la troisième cellule. Il est alors placé dans la coque en béton préfabriquée. L'espace annulaire entre le panier et la coque béton est rempli à l'aide d'un mortier. C'est l'opération de calage.
- 3-** Enfin, la coque béton est bouchée par la mise en œuvre d'un bouchon en béton vibré.
- 4-** Après contrôle de la qualité du colis, celui-ci est extrait de la troisième cellule pour être acheminé dans l'un des halls d'entreposage.

Ce process nécessite donc la fabrication de trois types de matrices cimentaires, le coulis de blocage, le mortier de calage et le béton de bouchage. La qualité et la durabilité de colis de déchets nécessite des conditions de fabrication et de mise en œuvre strictes.

MAQUETTE DE L'UNITÉ DE FABRICATION DU COULIS



11

© RAZEL-BEC



12

© RAZEL-BEC

PRINCIPALES SPÉCIFICATIONS DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE DES MATRICES CIMENTAIRES

La mise au point des formules de béton, mortier et coulis utilisées sur l'ICEDA ne fait pas partie des missions du GME. Ces formules sont mises au point par EDF et les matériaux sont livrés sur ICEDA sous forme de charges sèches prédosées en agrégats, ciment et additions. L'eau et les adjuvants sont introduits lors de la fabrication sur ICEDA.

La température à cœur du coulis de blocage des déchets dans les paniers doit rester inférieure à 75°C durant sa prise pour garantir sa durabilité (risque RSI).

Pour respecter ce critère la température du coulis frais et la température ambiante en cellule doivent respectivement être inférieure à 10°C et 30°C. Enfin, les outils de fabrication doivent être automatisés et doivent assurer la traçabilité des mortiers, bétons et coulis fabriqués.

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

L'installation comporte 4 unités de fabrication :

- 2 unités permettant la fabrication du coulis de blocage des déchets (dont une en secours). Chaque unité de fabrication du coulis comprend un réseau de distribution permettant de l'acheminer directement par pompage dans la cellule "chaude".
- 2 unités permettant la fabrication du mortier de calage ou du béton de bouchage (dont une secours). Les mortiers et béton sont acheminés en cellules dans une benne via un chariot de transport.

La conception de chaque unité de fabrication et de distribution du coulis est la suivante (figures 11 et 12) :

1- Les charges sèches sont acheminées dans un malaxeur de 330 l via une trémie crève sache. Un système de dosage avec une précision de +/- 2% permet l'introduction des adjuvants et de l'eau. Les contrôles sur coulis frais sont faits en sortie de malaxeur.

2- Le coulis est temporairement stocké dans une trémie d'une capacité de 1500 l jusqu'à avoir fabriqué les gâchées nécessaires au blocage d'un colis de déchets (2 à 3 gâchées en fonction du volume de déchets dans le panier).

3- Pour garantir une température de coulis inférieur à 10° chaque ligne de fabrication comprend un groupe froid qui a deux fonctions :

- Refroidir l'eau de gâchage à une température comprise entre 5 et 10°C.

- Alimenter le système de refroidissement du coulis. Celui-ci est constitué d'un circuit fermé de tuyauteries double peau, le coulis circulant au centre et l'eau de refroidissement autour. Le coulis y circule jusqu'à atteindre une température inférieure à 10°C.

4- L'ensemble de la ligne de fabrication est piloté par un automate qui communique avec les autres systèmes de conduite de l'ICEDA :

- Il reçoit l'information de la quantité de coulis à produire en fonction des déchets disposés dans le panier.

- Il reçoit les valeurs de température ambiante dans la cellule ainsi que la température du coulis pour autoriser la distribution du coulis en cellule.

- Il transmet à la supervision, les éléments de traçabilité du coulis fabriqué qui seront joints au dossier du colis.

Les unités de fabrication des bétons, mortier et coulis ont suivi un programme d'essai de mise en service visant à démontrer à la conformité au cahier des charges.

Ce programme s'inscrit dans le programme d'essai global de mise en service de l'ICEDA qui a débuté en avril 2018 par les essais de chaque système élémentaire de l'installation. Il s'est poursuivi à l'automne 2018 par les essais d'interfaces entre systèmes élémentaires. En mars 2019, les premières séquences du process ont été testées. À l'été 2019, des essais

en conditions industrielles dont le but est de démontrer l'atteinte des performances de l'ICEDA en termes de cadence et de qualité de réalisation seront réalisés avec des métalliques non radioactifs. L'autorisation de mise en service en actif de l'ICEDA par l'ASN devrait intervenir à l'automne 2019 permettant la livraison des premiers déchets et la réalisation des derniers essais avant un début d'exploitation d'ICEDA par EDF début 2020 pour une durée prévisionnelle de 50 ans, l'installation étant soumise à des réexamens périodiques de sûreté. □

LE GROS ŒUVRE EN QUELQUES CHIFFRES

- 300 inclusions rigides de diamètre 1 m représentant 10 000 m³ de béton
- 35 000 m³ de béton de structure
- 5 500 t d'armatures passives soit un ratio moyen de 160 kg/m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

PROCÉDURE : Marché en Conception Construction.

MAÎTRISE D'OUVRAGE ET EXPLOITANT : Électricité De France Direction des Projets de Déconstruction et de Déchets (DP2D)

GROUPEMENT EN CHARGE DE LA CONCEPTION ET DE LA RÉALISATION DE L'ICEDA :

- Razel-Bec (mandataire)
- Ingerop
- Bilfinger Noell
- Cegelec Cem
- Bouygues Construction Services Nucléaires
- Omexom (Vinci Énergies)

DURÉE DE LA PHASE CONCEPTION : mars 2008 - novembre 2008 : 8 mois

DURÉE DE LA PHASE CONSTRUCTION : septembre 2009 - décembre 2019 : 88 mois

MONTANT DU MARCHÉ DE CONCEPTION CONSTRUCTION : 186 M€

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE ICEDA NUCLEAR FACILITY AT BUGEY (AIN REGION)

NICOLAS NAULET, DIRECTEUR DU PROJET, RAZEL-BEC

The "ICEDA" activated waste conditioning and storage facility was built under a Design and Build contract which ends in 2019. This nuclear facility delivered on a turnkey basis will enable EDF to condition in concrete packages the wastes resulting from the operation and dismantling of the French nuclear fleet. Its rigid inclusions foundation technique is a first in France for a nuclear facility. In addition to overall management of the project and civil engineering works for the facility, Razel-Bec was responsible for execution of the production units for the grouts and mortars designed to fill the concrete packages. □

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN NUCLEAR ICEDA DE BUGEY (AIN)

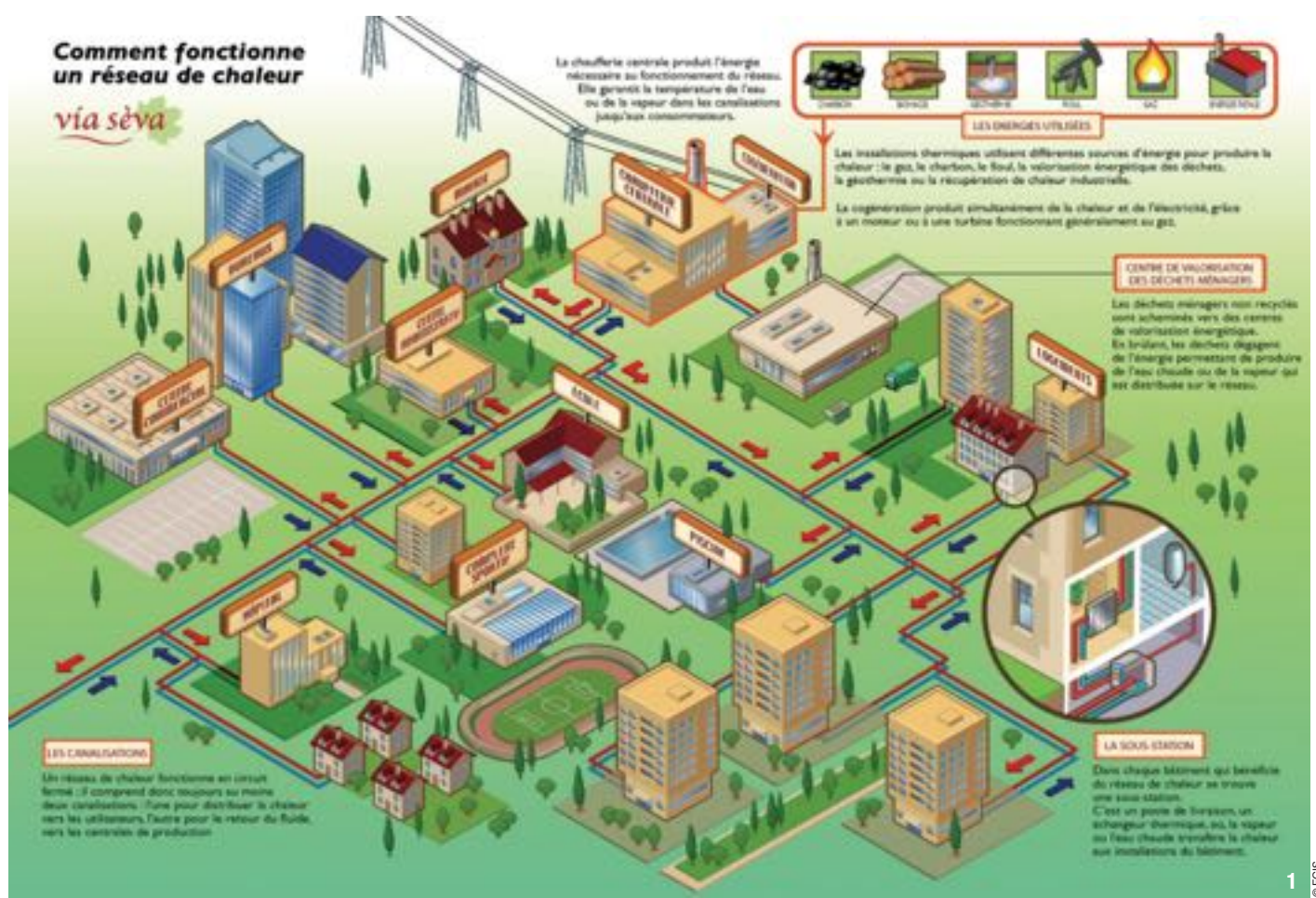
NICOLAS NAULET, DIRECTEUR DU PROJET, RAZEL-BEC

La Instalación de Acondicionamiento y Almacenamiento de Residuos Activados (ICEDA) fue construida en el marco de un contrato de diseño y construcción finalizado en 2019. Esta instalación nuclear entregada llave en mano permitirá a EDF acondicionar en contenedores de hormigón residuos procedentes de la explotación y el desmantelamiento del parque nuclear francés. Su modo de cimentación sobre inclusiones rígidas es una primicia en Francia para una instalación nuclear. Además de la dirección general de la operación y de la construcción de la ingeniería civil de la instalación, Razel-Bec se ha encargado de construir unidades de fabricación de las lechadas y morteros destinados a rellenar los contenedores de hormigón. □

LES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID : INTÉRÊT ET FONCTIONNEMENT - L'EXEMPLE DE LA CHAUFFERIE DE SURVILLE

AUTEURS : THOMAS GUILLAUD, INGÉNIEUR GÉNIE CIVIL ÉNERGIE, EGIS - BENOIT ESPARCIEUX, ESTIMATION ET CONTRÔLE PROJET ÉNERGIE, EGIS - FANNY GRAVALON, INGÉNIEURE PROCESS ÉNERGIE, EGIS - SÉBASTIEN BURDINAT, INGÉNIEUR PROCESS ÉNERGIE, EGIS - DOMINIQUE MESLET, RESPONSABLE ACTIVITÉ ÉNERGIE

LES BESOINS EN CHAUFFAGE ET EN CLIMATISATION AUGMENTENT ET REPRÉSENTENT UNE PART IMPORTANTE DES ÉMISSIONS EN GAZ À EFFET DE SERRE CONTRIBUANT AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE. LES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID UTILISANT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES SONT EN PLEIN DÉVELOPPEMENT POUR RÉPONDRE À CES PROBLÉMATIQUES ET L'EXEMPLE DE LA CHAUFFERIE DE SURVILLE À LYON EN EST UNE BONNE ILLUSTRATION.



INTRODUCTION
 La loi du 17 août 2015 sur la transition énergétique pour la croissance verte a permis d'accélérer le développement des réseaux de chaleur et de froid en France. En effet, le but de cette loi vise à réduire l'impact de notre consommation énergétique sur l'environnement et

donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluant pour l'air. Les réseaux de chaleur et de froid se retrouvent donc au centre de cette transition écologique pour la production de chaleur ou froid car ils permettent de répondre à plusieurs problématiques imposées par la loi notamment :

1- Schéma récapitulatif du fonctionnement d'un réseau de chaleur.

1- Summary diagram of the operation of a district heating network.

- 1- De réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40% entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050.
- 2- De réduire la consommation énergétique finale de 50% en 2050 par rapport à la référence 2012, en visant



© EGIS 2

3

un objectif intermédiaire de 20% en 2030. Cette dynamique soutient le développement d'une économie efficace en énergie, notamment dans les secteurs du bâtiment.

- 3- De réduire la consommation énergétique primaire des énergies fossiles de 30% en 2030 par rapport à l'année de référence 2012.
- 4- De porter la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32% de cette consommation en 2030 ; à cette date, pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent représenter 40% de la production d'électricité, 38% de la consommation finale de chaleur, 15% de la consommation finale de

2- Dépotage d'un camion.

3- Crible à étoiles.

4- Silo vide.

5- Silo plein avec la vis tubée servant à l'extraction du bois.

2- Unloading a lorry.

3- Screening system.

4- Empty silo.

5- Full silo with the tube screw used for removal of wood.

carburant et 10% de la consommation de gaz.

- 5- De contribuer à l'atteinte des objectifs de réduction de la pollution atmosphérique prévus par le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques défini à l'article L. 222-9 du code de l'environnement.
- 6- De multiplier par cinq la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030.

- 40 000 bâtiments raccordés (logement, travail, loisirs),
 - 350 villes pourvues d'un réseau,
 - 25 000 GWh distribués,
 - 5 400 km de canalisations,
 - Puissance installée : 20 GW (soit l'équivalent de 13 réacteurs nucléaires),
 - 56% taux d'énergie verte.
- Ils couvrent 6% des besoins de chauffage français.

En France les réseaux de froid représentent :

- 23 réseaux,
- 1 200 bâtiments raccordés (logement, travail, loisirs),
- 1 000 GWh distribués,
- 200 km de canalisations,
- Puissance installée : 850 MW.

QUELQUES CHIFFRES

En France les réseaux de chaleur représentent :

- 761 réseaux,



© EGIS 4

5

COMMENT FONCTIONNE UN RÉSEAU DE CHALEUR OU DE FROID ?

Un réseau de chaleur ou de froid se décompose en trois grandes parties :

- La production,
- L'acheminement,
- La livraison aux clients.

PARTIE PRODUCTION

La production de chaleur ou de froid est assurée par une ou plusieurs chaufferies ou centrales de froid.

Ces centres de production utilisent des sources d'énergies renouvelable (biomasse, géothermie, solaire) et ou des énergies fossiles (gaz, fioul, charbon) et ou la récupération d'énergie industrielle (usine d'incinération d'ordures ménagères, ...).

PARTIE ACHEMINEMENT

L'acheminement de la chaleur ou du froid est assuré par des réseaux enterrés depuis le lieu de production jusqu'aux points de livraison.

Cet acheminement se fait grâce à un fluide caloporteur qui peut être sous forme d'eau ou de vapeur.

Le réseau possède une canalisation aller qui amène le fluide chaud (ou froid pour les réseaux de froid), et une canalisation retour qui le ramène une fois refroidi (ou réchauffé pour les réseaux de froid).

LA LIVRAISON

La chaleur ou le froid est livré et compté au niveau d'un poste de livraison appelé "sous-station", via un échangeur qui marque non seulement la séparation physique entre le réseau primaire et le réseau secondaire, mais représente également la limite contractuelle du service, en général à l'aval de l'échangeur.

SCHÉMA RÉCAPITULATIF

Le fonctionnement global d'un réseau de chaleur est illustré dans la figure 1.

PRÉSENTATION DU CHANTIER DE LA CENTRALE BIOMASSE DU RÉSEAU DE CHALEUR DE LYON

INTRODUCTION

Dalkia a été retenu par la métropole de Lyon pour exploiter le réseau de chaleur et de froid du Grand Lyon.

Dalkia a confié à Egis (activité Environnement et Énergie) la maîtrise d'œuvre des investissements de premier établissement (développement/extension du réseau et des nouveaux centres de production).



6

© EGIS

Parmi les investissements de développement prévus par Dalkia, la création de la centrale biomasse est au cœur du réseau notamment pour répondre aux exigences d'augmenter la production de chaleur par les énergies renouvelables.

La centrale de production de chaleur de Surville, dont l'inauguration a été faite le 11 avril 2019, est la plus importante chaufferie biomasse publique de France. La chaufferie de Surville comprend 3 chaudières bois de 17 mégawatts chacune.

FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE BIOMASSE

Pour comprendre le fonctionnement de la centrale biomasse de Surville, le meilleur moyen est de suivre le chemin du bois.

6 & 7- Vue des chaudières (19 m de haut).

6 & 7- View of the boilers (19 m high).

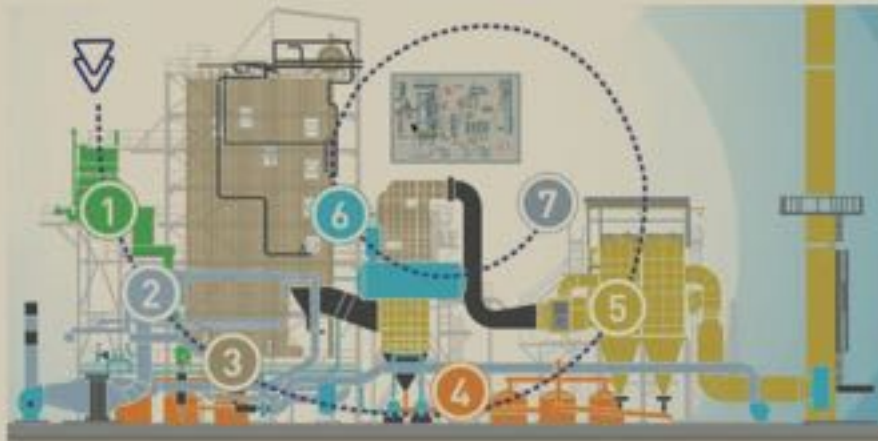
Le bois est issu des déchets de l'industrie forestière (plaquettes) et arrive par camion avec une provenance locale pour limiter l'empreinte carbone liée aux transports (figure 2). Les camions sont dans un premier temps pesés pour comptabiliser la quantité de bois qui entre sur site. Il est ensuite déposé pour être envoyé dans une unité de criblage afin d'éliminer les plus gros fragments de bois et rentrer dans les spécifications des chaudières (figure 3). Le bois est ensuite stocké dans un silo de 6 000 m³ correspondant à la



7

© EGIS

FONCTIONNEMENT DE LA CHAUDIÈRE



© LEROUX ET LOTZ

8

consommation d'un long week-end (4 jours) de grand froid sans livraison. Les dimensions du silo atteignent 52 m de long x 22 m de large x 20 m de haut (figure 4).

Le bois est ensuite envoyé vers les chaudières depuis le silo. L'extraction du bois est faite par une vis tubée sans fin qui se déplace sous le tas de bois (figure 5).

Les chaudières utilisent la technologie appelée *lit fluidisé bouillonnant*. Elles mesurent près de 19 m de haut (figures 6 et 7).

8 - Fonctionnement de la chaudière.
9 - Schéma en plan du site.

8 - Boiler operation.
9 - Schematic plan view of the site.

Le lit de combustion est réalisé par la mise en suspension d'un lit de sable en injectant de l'air à la base des chaudières par un système de buses, sur lequel on déverse la biomasse.

Le foyer est maintenu à 800°C, le rendement de combustion avoisine les 95%. Cette technologie permet de respecter les contraintes environnementales exigeantes.

La récupération de la chaleur se fait au moyen d'une boucle d'eau qui chemine via des tuyauteries dans le process de combustion.

Pour maximiser le rendement, la chaleur est également récupérée au niveau des fumées et au niveau du foyer de la chaudière.

Les cendres et poussières sont récupérées et réutilisées dans des filières adaptées notamment pour la fertilisation des sols.

L'eau surchauffée ainsi produite (120°C) est ensuite envoyée sur le réseau de chaleur pour alimenter les consommateurs. La chaufferie de Surville doit couvrir 20% de la production de chaleur du réseau du Grand Lyon. Le fonctionnement de la chaudière est illustré sur le schéma présenté en figure 8 avec les éléments suivants :

- 1- L'alimentation biomasse,
- 2- Le système de combustion BFB,
- 3- La chaudière à tubes d'eau,
- 4- Le système de traitement des mâchefers et des cendres volantes,
- 5- Le traitement des fumées,
- 6- Le poste d'eau,
- 7- Le contrôle commande et l'électricité.

En vue en plan, la répartition des équipements sur le site est illustrée sur la figure 9.

Pour pallier tous dysfonctionnements ou arrêts, la chaufferie est équipée de chaudières de secours fonctionnant au gaz.

Pour chaque changement d'unité (dépotage, crible, silo), le transfert se fait par des convoyeurs à bandes.

CONCEPTION ARCHITECTURALE ET INSERTION

Le bâtiment hébergeant les bureaux et la chaudière biomasse a fait l'objet d'un traitement architectural, qui a été confié à Enia architecte (figure 11).

L'intégration paysagère de la chaufferie est un élément très important car elle se situe en agglomération dans le 7^e arrondissement de Lyon avec une présence de riverains importante.

L'acceptation du projet par les riverains évite les blocages administratifs qui ont des conséquences importantes sur le planning. L'architecte a prêté une grande attention à l'impact visuel et à l'intégration du projet dans l'environnement. Les volumes les plus importants (halle biomasse, silo stockage) se trouvent au centre de la parcelle. Ainsi l'impact sur l'espace public est minime grâce aux arbres plantés et au traitement paysager réalisé en limite de la parcelle. Le long de la rue, les volumes de faibles hauteurs renferment les parties administratives et techniques du projet, et constitue ainsi une réelle façade urbaine, à l'échelle de la rue.

SCHÉMA EN PLAN DU SITE



© EGIS

9

Les entrées, situées du côté des riverains, libèrent un linéaire de pourtour de parcelle important pour la conservation des zones plantées existantes et l'aménagement de nouveaux dispositifs paysagers. Une bande écran composée d'un talus planté est spécialement prévue à l'ouest pour protéger visuellement les bureaux de la rue.

L'aménagement des abords de la parcelle incluent une végétation abondante et un talus qui dissimulent le dispositif de dépotage. Elle permet de respecter les contraintes du PLU qui impose de mettre en valeur une zone boisée. Ces dispositifs réduisent l'impact visuel de l'ensemble et s'intègrent parfaitement dans le dispositif paysager global.

POINT TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

Le point principal pour la construction des ouvrages de la chaufferie de Surville a été la préparation du site. Comme beaucoup de ces sites, ils sont implantés sur d'anciennes friches industrielles.

La chaufferie de Surville est implantée sur un ancien site d'une centrale EDF dont des vestiges enterrés de fondation ont été trouvés lors des sondages préliminaires.

Pour s'affranchir de démolir entièrement ces vestiges (seul les éléments affleurant ont été écrêtés) et limiter les évacuations de terre en filière spé-



10
© EGIS

cialisée, un renforcement de sol a été réalisé. Cette technique est réalisée par un compactage dynamique du terrain d'assise pour densifier et réduire les vides sous les ouvrages. Ce compactage est réalisé avec un maillage de l'ordre de 3 m par 3 m. Ces travaux de compactage ont conduit à un abaissement général de la plateforme de l'ordre de 20 cm.

Cet abaissement a été compensé par l'apport de matériaux granulaires pour réaliser les plateformes des ouvrages. Cette étape a été particulièrement surveillée vis-à-vis de l'impact sur l'environnement au niveau de l'acoustique

10 - Vue générale du transport de biomasse.

11 - Vue du bâtiment bureaux et hall chaudière biomasse.

10 - General view of biomass transport.

11 - View of the office building and biomass boiler bay.

(présence de riverains proches) et des vibrations (présence de voies SNCF en limite de propriété). Du matériel adapté aux zones urbaines a été utilisé pour respecter les normes en vigueur et toutes les nuisances ont été enregistrées et suivies.

Le schéma de principe est fourni sur la figure 12.

Grâce au renforcement de sol, les ouvrages ont été fondés sur des fondations superficielles (au lieu de fondations semi-profondes sans renforcement de sol).

Les bâtiments process (dépotage, crible, silo et chaudière biomasse) ont été réalisés en structure charpente métallique, le bâtiment administratif et les bâtiments pour les chaudières de secours en béton armé.

ENJEU PLANNING

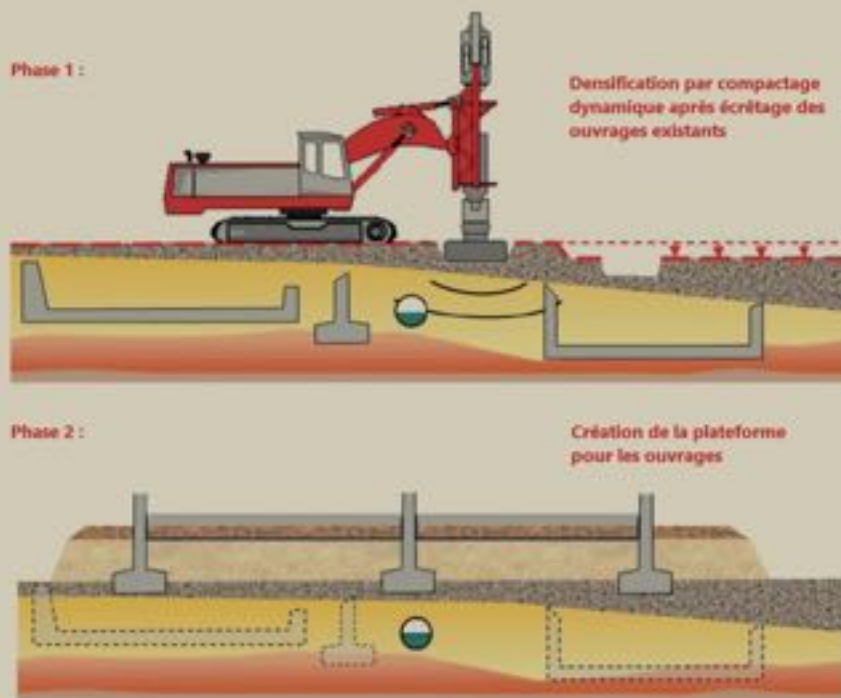
Cette technique a aussi permis de gagner sur le planning de construction. Le planning est l'élément le plus important du projet pour le client. En effet les essais de fonctionnement finaux doivent être réalisés durant la période de chauffe (octobre à avril) pour pouvoir évacuer la chaleur sur le réseau. Un décalage de planning peut engendrer une perte d'une année d'exploitation avec les conséquences financières associées.

Pour Egis, maître d'œuvre du projet, la gestion du planning a été l'enjeu



11

SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA CONSTRUCTION



© EGIS

12

principal du projet et le critère principal de réussite du projet de la phase étude jusqu'à la phase travaux.

La réussite de la tenue des délais est passée par plusieurs étapes :

→ En premier lieu, cela est passé par l'écoute et la parfaite compréhension des attentes du client Dalkia via une équipe de projet Egis intégrée en phase avant-projet.

→ La maîtrise du Dossier de Demande d'Autorisation Environnementale (DDAE) pour sécuriser les délais et impositions administratives pour la construction et l'exploitation du site.

12- Schéma de principe de la construction.

12- Schematic diagram of building.

→ La mise en place d'un processus BIM (4D max) dès le démarrage des études et jusqu'en phase chantier. La maquette numérique est ainsi

devenue le référentiel de conception du projet ce qui a permis de fédérer les équipes et d'augmenter considérablement l'appropriation par les entreprises réalisatrices des contraintes du chantier avant leur enclenchement. Elle a permis, en phase chantier, de manager de façon efficace et en amont les interfaces entre les différents lots.

→ Une proximité et une implication forte de toute l'équipe de la maîtrise d'œuvre depuis la phase de conception jusqu'à la livraison, en passant par la phase travaux.

Les chiffres en phase travaux :

- Effectif entreprises sur chantier d'environ 100 personnes, de mai 2018 à Janvier 2019 ;
- 7 lots de travaux (chaudières gaz, chaudières bois, convoyage, analyseurs fumées, électricité courant fort et courant faible-contrôle-commande-supervision, fluides, GC) portés par 7 entreprises accompagnées de 110 sous-traitants.

En phase travaux, les entreprises ont maximisé les éléments préfabriqués et l'assemblage en usine qui a permis de réduire les temps de montage sur chantier et limiter la co-activité notamment entre l'entreprise de génie civil et les entreprises de montage. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 6 000 m³

ARMATURES : 350 t

ACIER POUR LES CHARPENTES : 720 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MANDATAIRE DU MAÎTRE D'OUVRAGE : Dalkia Centre Est

MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis Industries

ARCHITECTE : Enia architectes

LOT CHAUDIÈRES : Leroux & Lotz

LOT CONVOYAGE BOIS : Sera

LOT ÉLECTRICITÉ : Actemium

LOT TUYAUTERIE : Jmoos

LOT GÉNIE CIVIL : Citinea

ABSTRACT

DISTRICT HEATING AND COOLING NETWORKS: BENEFITS AND OPERATION - EXAMPLE OF THE SURVILLE BOILER PLANT

THOMAS GUILLAUD, EGIS - BENOIT ESPARCIEUX, EGIS - FANNY GRAVALON, EGIS - SÉBASTIEN BURDINAT, EGIS - DOMINIQUE MESLET

Thanks to ecological transition legislation, district heating and cooling networks are expanding rapidly in France. They provide a response to energy consumption issues while reducing emissions of atmospheric pollutants. This is made possible, for example, by high-capacity boiler plants using renewable energies, such as the biomass boiler plant at Surville, in Lyon, which was designed by Egis and will be operated by Dalkia. These facilities are often located on former industrial waste land on which there are major soil constraints due to pollution and existing buildings. □

LAS REDES DE CALOR Y FRÍO: INTERÉS Y FUNCIONAMIENTO - EL EJEMPLO DE LA SALA DE CALDERAS DE SURVILLE

THOMAS GUILLAUD, EGIS - BENOIT ESPARCIEUX, EGIS - FANNY GRAVALON, EGIS - SÉBASTIEN BURDINAT, EGIS - DOMINIQUE MESLET

Con la ley de transición ecológica, las redes de calor y frío están en pleno desarrollo en Francia. Permiten responder a las problemáticas de consumo de energía, reduciendo a la vez las emisiones de contaminantes atmosféricos. Esto es posible gracias a la creación, entre otros elementos, de salas de calderas de gran potencia basadas en energías renovables. Este es el caso de la sala de calderas de biomasa de Surville, en Lyon, diseñada por Egis y que operará Dalkia. Estas instalaciones suelen estar ubicadas en antiguos solares industriales que presentan importantes restricciones de suelo para la contaminación y construcciones existentes. □



1
© URBANERA

DOUBLE SMART GRID À L'ÉCHELLE D'UN ÎLOT URBAIN

AUTEURS : LAURENT LE DEVEHAT, DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT GÉNIE CLIMATIQUE, INGEROP -
CHRISTOPHE RODRIGUEZ, DIRECTEUR TECHNIQUE ET INNOVATION, DALKIA SMART BUILDING

DANS LE CADRE DU PROJET D'AMÉNAGEMENT URBAIN "CŒUR DE QUARTIER" À NANTERRE (92), UN DOUBLE SMART GRID PERMETTANT LE PARTAGE D'ÉNERGIE ENTRE BÂTIMENTS A ÉTÉ IMAGINÉ POUR ALIMENTER EN CHAUD ET EN FROID LE PROGRAMME IMMOBILIER RÉSIDENTIEL ET COMMERCIAL "NANTERRE CŒUR UNIVERSITÉ" DE BOUYGUES IMMOBILIER. DÈS LA CONCEPTION DU PROJET QUI SERA FINALISÉ EN 2020, LA RÉFLEXION S'EST PORTÉE À LA FOIS SUR LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE GLOBALE DU QUARTIER MAIS AUSSI SUR LA PERFORMANCE DE CHACUN DES BÂTIMENTS AFIN DE TENIR DES OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX AMBITIEUX : 60 % D'ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE RÉCUPÉRATION GARANTIS SUR 27 ANS.

OBJECTIFS DU PROJET

Il s'agit d'un projet innovant sur le plan environnemental, qui valorise les énergies renouvelables locales et déploie une intelligence artificielle afin d'optimiser au maximum les consommations énergétiques des bâtiments.

Le projet est réalisé sur un terrain situé à Nanterre (92) entre le boulevard Blaise Pascal, le boulevard des Provinces Françaises et l'esplanade Patrice Chéreau (figures 1 à 3).

L'ensemble immobilier mixte de 77 000 m² SDP est subdivisé en trois tranches (figure 4) :

→ Tranche 1 : parking privé, commerces, logements (lots 7 & 8) – 14 000 m² SDP.

→ Tranche 2 : commerces, cinéma, bureaux-Outside (lot 6) ; commerces, logements (lot 9) – 22 000 m² SDP.

→ Tranche 3 : commerces, bureaux-Upside (lot 4) ; commerces, logements (lots 3 & 5) – 41 000 m² SDP.

→ Parking mutualisé en sous-sols des Tranches 2 & 3 de 761 places.

L'opération Nanterre Cœur Université s'inscrit dans une démarche d'excellence environnementale traduite par les certifications et labels suivants :

→ Certification CERTIVEA "HQE Aménagement".
→ Démarche "BiodiverCity Aménagement".

1- Vue du Parvis.

1- View of the square.

Pour les immeubles de bureaux divisés en deux lots (lots 4 et 6), les certifications suivantes ont été visées :

→ RT2012 ;
→ Label Bepos Effinergie ;
→ Référentiel Green Office® ;
→ HQE niveau Exceptionnel et BREEAM Very Good sur le lot 4 ;
→ HQE et Breeam niveau excellent sur le lot 6 ;
→ Well et Wiredscore Silver sur le lot 6.

À ces démarches environnementales s'ajoutent les objectifs énergétiques suivants :

→ + de 40 % d'ENRR sur les 5 usages réglementaires de la RT 2012 à l'échelle du quartier ;

→ 60 % d'ENRR sur les productions de chauffage et Eau Chaude Sanitaire (ECS) à l'échelle du quartier.

Les exigences pour les immeubles de bureaux ont été renforcées afin de permettre :

→ La surdensification sur demande preneur à 1 pers./7 m² ;

→ Le maintien de conditions de confort plus contraignantes : 23°C en hiver et/ou 24°C en été sur demande preneur.

LOCALISATION DU SITE



© URBANERA

2

Pour répondre aux exigences environnementales de l'opération, il a mis à profit 5 sources énergétiques renouvelables locales (figure 5) :

- Le soleil via des panneaux photovoltaïques installés en toiture des bâtiments de bureaux à raison de + de 3000 m² de modules à très haute performance ;
- La géothermie via un réseau de sondes sèches à raison de 90 sondes à 150 m de profondeur ;

2- Localisation du site.
3- Vue des bureaux.

2- Site location.
3- View of the offices.

- L'air via un dispositif de free-chilling (production sur dry-adiabatique sans compression lorsque les conditions extérieures sont favorables en mi saison principalement) ;
- La biomasse via des micros cogénérations installées sur les bâtiments de bureaux à l'huile de colza ;
- La récupération de calories sur les eaux usées des résidences.

On notera que l'atteinte de la performance sur le réseau de chaleur permet une TVA réduite à 5,5% pour les preneurs.

LE PROJET COMPREND 2 SMART GRIDS

Un Smart Grid Thermique

La chaufferie Thermofrigopompe géothermique alimente en chauffage, ECS et climatisation l'ensemble du Quartier.

Le stockage de 70 m³ a été prévu afin de :

- Maximiser le taux d'énergie renouvelable ;
- Mieux maîtriser le lissage des appels de puissance thermique ;
- Mieux maîtriser le lissage des appels de puissance électrique afin de garantir une totale autoconsommation de l'électricité produite.

Un Smart Grid Électrique

Un poste HTA Opérateur dédié alimente une boucle électrique spécifique qui permet :

- Alimenter électriquement la chaufferie PAC TFP Géothermique ;
- Alimenter les équipements de production de chauffage, ECS et Climatisation du projet ;
- Auto consommer l'intégralité de la production électrique des micros cogénérations et du photovoltaïque ;
- Mieux maîtriser le lissage des appels de puissance électrique afin de garantir une totale autoconsommation de l'électricité produite par les cogénérations des bureaux. ▷



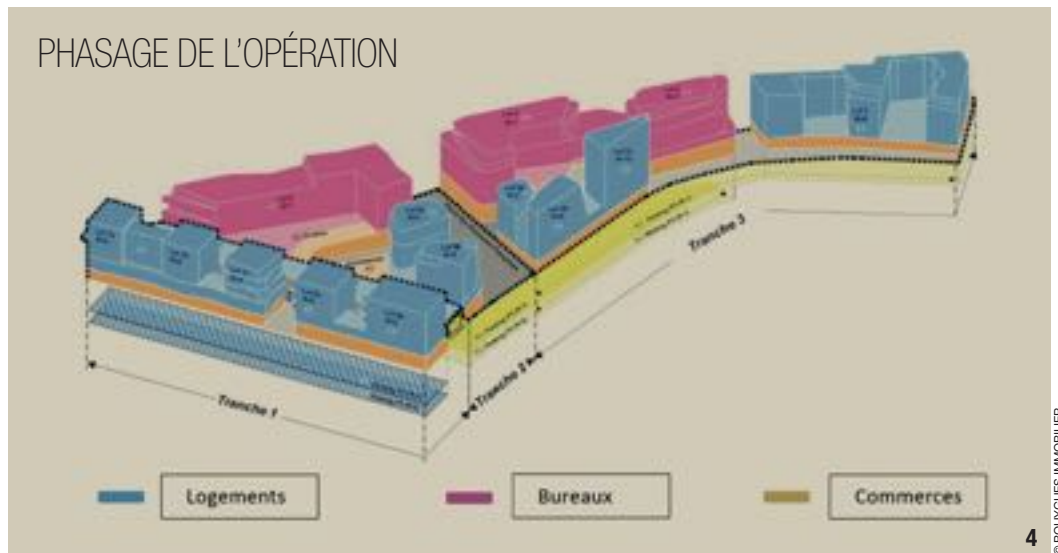
© URBANERA

3

Une régulation spécifique très innovante agit sur le stockage/déstockage des PAC TFP et sur la puissance des onduleurs PV afin de garantir 100 % d'autoconsommation.

Côté production de chaleur et de froid, il avait été envisagé dans un premier temps de réaliser une boucle énergétique (figure 6) à basse température avec pompes à chaleur dans chaque bâtiment et pour chaque usage.

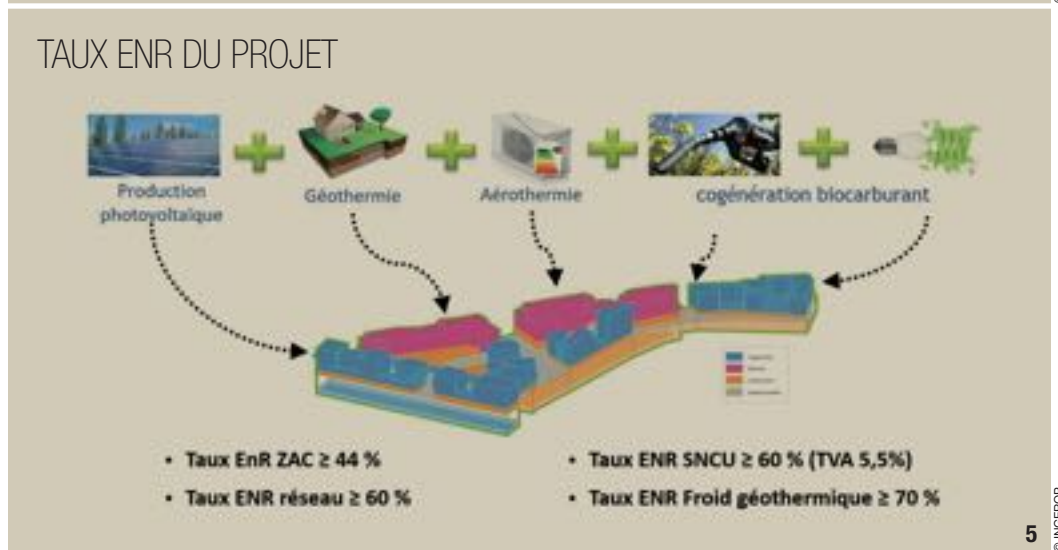
Cette hypothèse a été abandonnée au profit d'une production centralisée moins onéreuse au global et plus performante, "un véritable cœur énergétique".



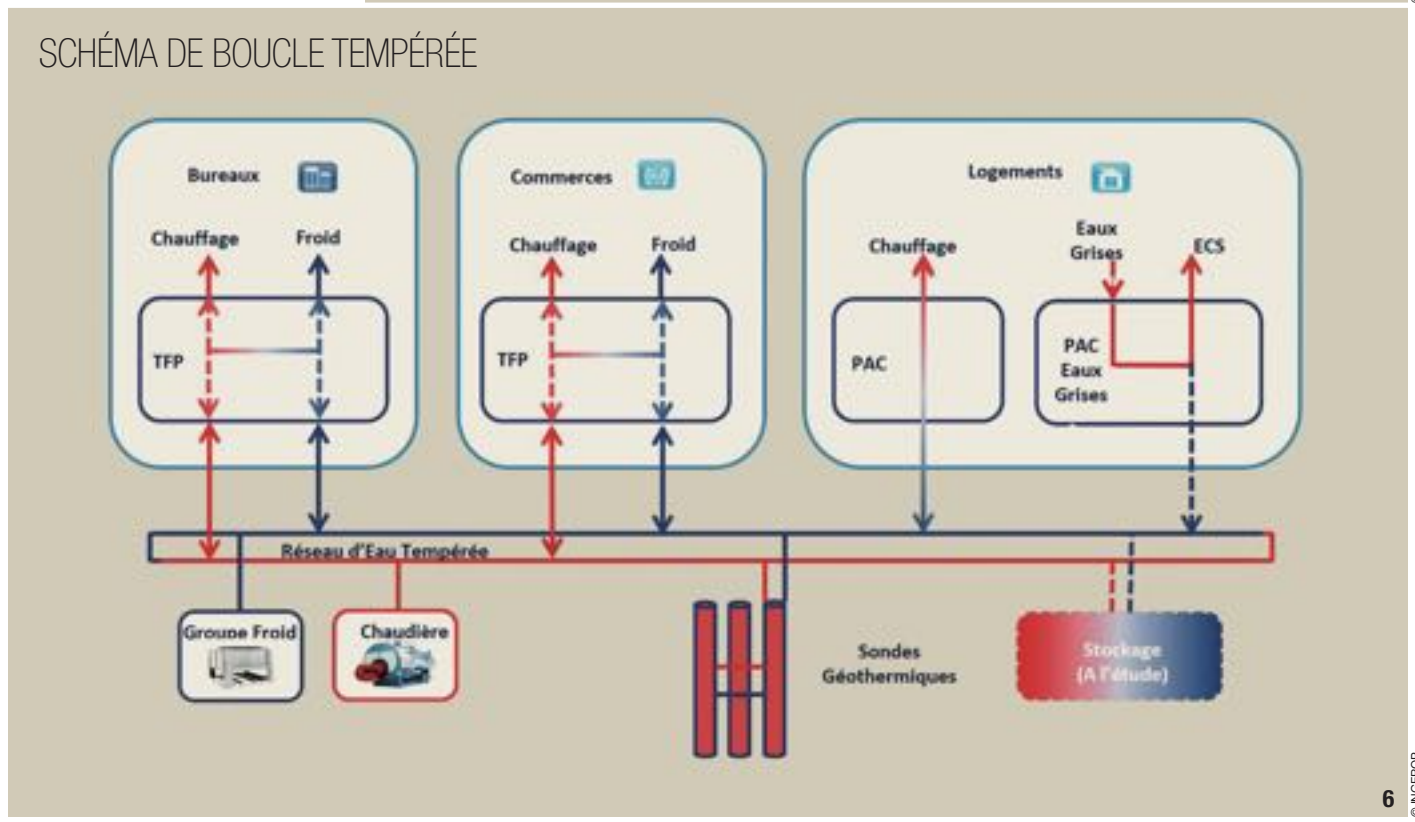
4 © BOUYGUES IMMOBILIER

- 4- Phasage de l'opération.
- 5- Taux ENR du projet.
- 6- Schéma de boucle tempérée.

- 4- Project sequencing.
- 5- Project REN rate.
- 6- Temperate circuit diagram.



5 © INGEROP



6 © INGEROP

LE "CŒUR ÉNERGÉTIQUE" COMPREND

- Une production de type thermo-frigo-pompe sur sondes géothermiques comportant deux groupe frigorifiques installés en série de puissance unitaire 500 kW en mode chauffage ;
- Une production de chaleur en appoint et secours avec chaudières gaz de puissance totale 2 MW ;
- Une distribution de chaleur à 63°C/43°C vers les sous-stations pour le chauffage Une distribution de froid 8°C/13°C vers les sous-stations pour le rafraîchissement ;
- Un champ de 90 sondes géothermiques verticales de 150 m permettant un transfert d'énergie saisonnier ;
- Un stockage de 70 m³ côté chauffage permettant un transfert d'énergie journalier entre les différents usages (figure 7).

La centralisation de la production a également permis de regrouper toute la complexité des installations en un seul lieu et d'en faciliter la conduite en exploitation. Chaque bâtiment est

raccordé au "cœur énergétique" par un système de distribution 4 tubes. Les sous-stations sont équipées d'échangeurs à plaques sur les réseaux de chauffage et de rafraîchissement.

La maintenance est donc simplifiée dans les bâtiments par rapport à une installation sur boucle tempérée où seraient installés une multitude de pompes à chaleur.

Selon les bâtiments, les sous-stations comprennent des distributions secondaires :

- À 60°C/40°C pour le chauffage et permettant un niveau de température suffisant pour la production d'eau chaude sanitaire ;
- À 9°C/14°C pour le rafraîchissement.

Des équipements complémentaires (figure 8) sont prévus sur certains ouvrages :

- Récupération de chaleur fatale sur les eaux usées des bâtiments de logements ;
- Pompe à chaleur ou VRV dans les commerces livrés bruts.

Le forage géothermique a fait l'objet d'études particulièrement poussées afin de déterminer le dimensionnement optimal en prenant en compte :

- Les besoins des bâtiments issus de simulations thermiques dynamiques ;
- La réponse du sol du point de vue énergétique sur 30 ans.

Il s'agissait de vérifier que les dérives de température du sol permettaient de conserver un fonctionnement de type Bepos/Greenoffice avec les taux d'ENR demandés sur la durée du contrat de fourniture d'énergie.

Les 90 sondes à 150 m de profondeur constituent un véritable échangeur de plusieurs milliers de m³ sous l'emprise du quartier. Le champ de sondes permet d'effectuer un stockage énergétique saisonnier fonctionnant de la manière suivante :

- En été, les excédents de calories du quartier sont injectés dans le sous-sol, qui se réchauffe donc ;
- En hiver, cette même chaleur est alors puisée pour répondre aux besoins de chaleur.

L'ENJEU EST D'ÉQUILIBRER LES TRANSFERTS ÉNERGÉTIQUES

Tout l'enjeu du dimensionnement consiste donc à équilibrer au mieux les transferts énergétiques annuels sur 30 ans pour garantir un dimensionnement et des performances optimum et pérennes.

Le quartier dispose ainsi d'une formidable source d'énergie renouvelable réversible ce qui contribue à son indépendance énergétique.

Les caractéristiques du champ de sonde sont présentées figure 9. ▷



© DALIKA 7

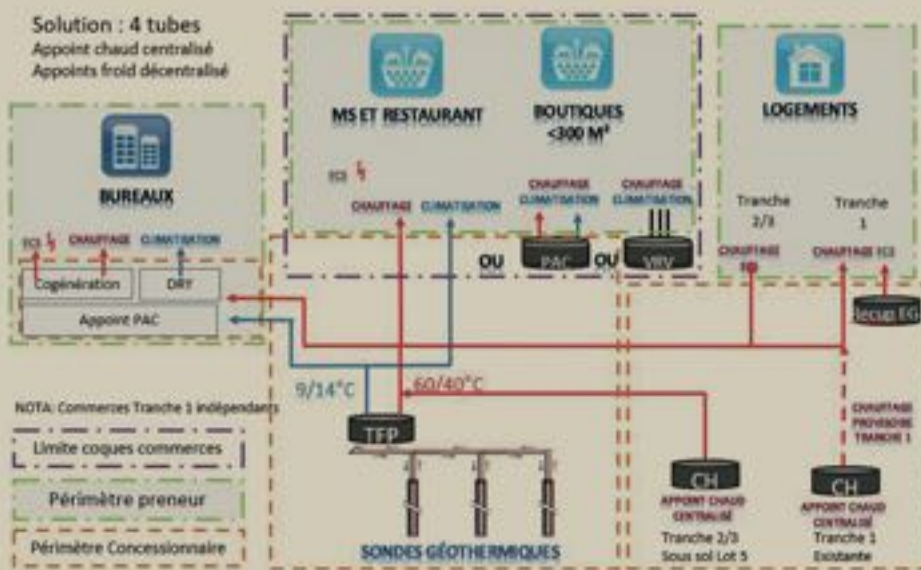
7- Stockage journalier.

8- Schéma de production centralisée.

7- Daily storage.

8- Centrally controlled production system.

SCHÉMA DE PRODUCTION CENTRALISÉE



© INGEFOP 8

Les sondes géothermiques ont été installées dès le début des travaux lors du terrassement du niveau de parking (figures 10). Pour atteindre les résultats attendus, des choix techniques complémentaires validés par simulation thermique dynamique ont été nécessaires.

Dans les bâtiments de logements :

→ L'installation de récupération de chaleur sur les eaux usées.

Dans les bâtiments de bureaux (figure 11) :

→ L'installation de plafonds chauffants et rafraîchissants en îlot afin de bénéficier de l'inertie des dalles structurales et limiter les appels de puissance sur les appareils terminaux. Ces terminaux permettent de bonnes conditions de confort avec des niveaux de température permettant la meilleure performance des productions.

Les plafonds sont alimentés en change-over depuis des collecteurs généraux par façade et orientation.

→ L'installation de diffuseurs à haute induction permettant le soufflage à la température de 14°C sans risque d'inconfort pour les occupants. Le soufflage est asservi à des sondes de présence.

→ La mise en œuvre de deux productions frigorifiques distinctes avec des températures de fonctionnement distinctes permettant un refroidissement sans compression lorsque les conditions de température extérieure s'y prêtent.

CARACTÉRISTIQUES DU CHAMP DE SONDÉS

- Conductivité thermique 1,64 W/(m.K)
- Température initiale du terrain 14,5 °C
- Résistance thermique effective moyenne 0,1 K/(W/m)



9

© BURGEAP

L'installation de deux productions frigorifiques distinctes améliore notablement la performance des bâtiments de bureau. En effet :

→ La production de froid à basse température a une bonne performance car la condensation est réalisée via le champ de sondes géothermiques. Elle est destinée à la déshumidification sur les centrales de traitement de l'air.

Le poids d'eau de l'air neuf est contrôlé pour éviter la condensation à une valeur de 14°C/9 gr/kgas maximum.

9- Caractéristiques du champ de sondes.

10- Installation de géothermie sur sondes.

a- Installation de forage. b-Sondes géothermiques. c- Collecteur géothermique.

9- Characteristics of the sensors field.

10- Geothermal power installation on sensors.

a- Drilling installation. b-Geothermal sensors. c- Geothermal collector.



10a

© INGEROP



10b

© INGEROP



10c

© INGEROP



© INGEROP

11

→ La production de froid à haute température alimente les plafonds froids. Elle est indépendante de la production centralisée et comporte :

- Des dry adiabatiques (fonctionnement sans eau dès que possible).
- Des productions de froid pouvant être by-passées.

Lorsque le by-pass est effectif, les groupes de production de froid

11- Plafond chauffant rafraîchissant.
12- Schéma d'autoconsommation.

11- Refreshing heating ceiling.
12- Self-consumption system.

sont à l'arrêt. Les plafonds rafraîchissants sont alimentés directement par le dry fonctionnant sans humidification avec un régime de température de 20/23°C. En période moins favorable, l'humidification est mise en service sur les dry adiabatiques. Enfin, lorsque le besoin s'en fait sentir, les groupes froids sont mis en

service quelques heures dans l'année. Le fonctionnement des groupes de production de froid sur dry adiabatique permet alors une performance optimale. Le régime d'alimentation des plafonds rafraîchissant est alors abaissé 18°C/21°C pour garantir les conditions de confort.

Ce n'est pas seulement une amélioration du coefficient de performance de la production de froid desservant les terminaux qui est obtenue. Pendant une grande partie de l'année, le groupe froid ne fonctionne pas et ne consomme rien avec une installation qui permet cependant de maintenir les conditions de confort pour les utilisateurs.

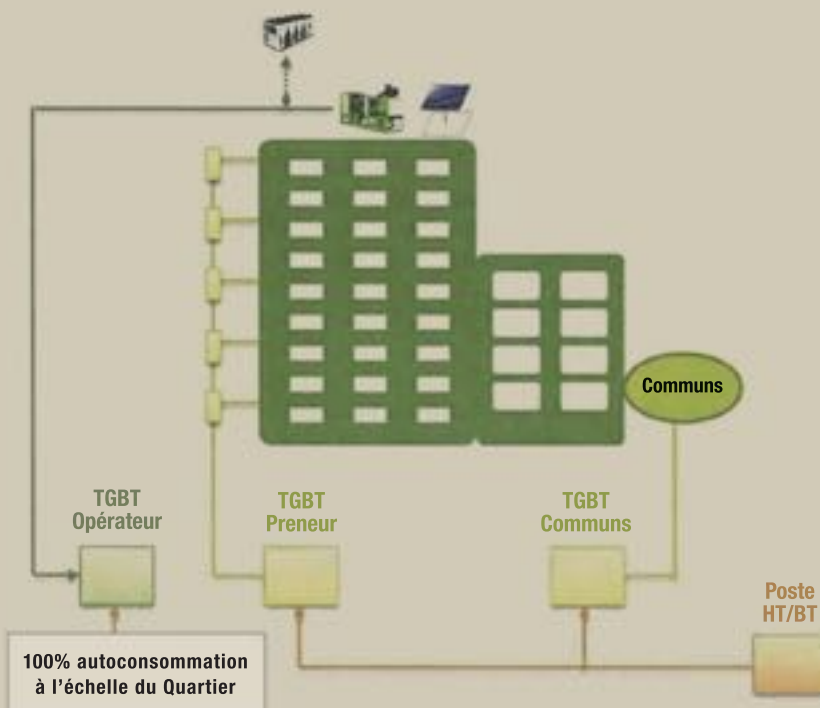
Pour favoriser ce mode de fonctionnement, les plafonds rafraîchissants ont été sélectionnés à une température élevée de 18/21°C ce qui n'est possible qu'avec un bâtiment possédant une enveloppe de très bonne qualité.

PARTIE ÉLECTRIQUE

Côté Smart Grid électrique (figure 12), le site est équipé sur les bâtiments de bureaux :

- De productions électriques photovoltaïques ;
 - Des cogénérateurs à huile de colza.
- Les modules de production photovoltaïques sont répartis sur une longueur de bâtiment de plus de 100 m constitués de modules photovoltaïques inclinés à 0° de type standard verre/tecllar et bi-verre et des onduleurs associés. ▷

SCHEMA D'AUTOCONSOMMATION



© INGEROP

12

L'énergie produite sera injectée directement dans les installations électriques du projet.

Par exemple, pour le bâtiment de Bureaux lot 4, la répartition des champs photovoltaïques du projet est la suivante :

L'objectif pour ce bâtiment est d'atteindre une installation produisant au minimum 230 MWh/an avec deux types de capteurs selon la localisation en toiture (tableau A).

La stratégie énergétique prévoit la valorisation de la production électrique issue de ces panneaux photovoltaïques en toiture à l'échelle du quartier via le réseau électrique dédié de l'Opérateur.

La production électrique est en permanence autoconsommée. En cas de production électrique supérieure à la consommation les actions suivantes sont réalisées par ordre de priorité :

→ Décalage des charges des stockages :

TABLEAU A : CARACTÉRISTIQUES

	Unité	Sunpower	FranceWatts	Total
Puissance unitaire	[Wc]			
Nombre de modules	[u]	552	246	
Nbre série/parallèle		12*46	41*6	
Puissance du champ de PV	[kWc]	199	32	231
Puissance totale onduleur	[kVA]	160	27	187
Surface utile	[m²]	900	394	1294

- Augmentation de la production des PAC Géothermiques avec recharge des stockages journaliers ;
- Augmentation de la production des pompes à chaleur sur eaux usées avec recharge des stockages ;
- Charges de ballons ECS électrique : installations de secours en cas de panne des cogénérations.

- Arrêt ou bridage des équipements producteurs :
 - Diminution de la production photovoltaïque ;
 - Arrêt forcé d'une ou de plusieurs cogénérations.

Afin de rendre possible ces modes de fonctionnement, une prédiction de charge en fonction des conditions

météorologiques est réalisée. En cas de prédiction de surproduction, la charge des ballons électriques sera limitée dans la période précédant la prédiction de surproduction.

L'alimentation électrique des chauffe-eaux pour la production d'eau chaude sanitaire des bureaux Green Office® des lots 4 et 6 (Hors RIE) est exclue du réseau électrique privé de l'Opérateur.

La production d'Eau Chaude Sanitaire des commerces reliées au Réseau de l'Opérateur sera assurée par :

→ Soit un échangeur dédié ECS relié à la production géothermique centralisée ;

→ Soit un cumulus électrique (hors lot Opérateur).

Si un problème technique se produit sur l'installation de production d'énergies renouvelables, un inverseur permet de basculer sur le réseau normal de production dimensionné afin de sécuriser la production en cas de panne. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

ENSEMBLE IMMOBILIER : 77 000 m²

OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES GARANTIS SUR 27 ANS :

- Taux ENR ZAC > 44 %
- Taux ENR réseau > 60 %

DOUBLE SMART GRID COMPRENANT :

- Thermopompe : 2*500 KW
- Chaufferie : 2 MW
- 90 sondes géothermiques à 150 m
- Stockage journalier 70 m³
- 3000 m² de panneaux photovoltaïques

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Bouygues Immobilier

CO-INVESTISSEUR, CO-CONCEPTEUR, RÉALISATEUR ET GESTIONNAIRE DES PRODUCTIONS ÉNERGÉTIQUES : Dalkia Smart Building

MAÎTRE D'ŒUVRE, COORDINATEUR DES ÉTUDES DE L'ENSEMBLE IMMOBILIER : Ingerop

MAÎTRE D'ŒUVRE EXÉCUTION : Cicad

GÉOTECHNICIEN : Burgeap

SUIVI ENVIRONNEMENTAL : Greenaffair

EXPLOITANT : Aveltyx

ABSTRACT

DOUBLE SMART GRID ON THE LEVEL OF AN URBAN STREET BLOCK

LAURENT LE DEVEHAT, INGEROP - CHRISTOPHE RODRIGUEZ, DALKIA SMART BUILDING

The double Smartgrid designed for the "Cœur de Quartier" urban development project in Nanterre (Paris region) comprises:

- A reversible heat pump and geothermal power boiler plant supplying heating, DHW and air conditioning for the whole district;
- An operator circuit allowing self-consumption of electricity produced locally. It exploits 5 local renewable energy sources to meet ambitious commitments: 60% of renewable energies and recovery guaranteed over 27 years:
- Solar via photovoltaic panels;
- Geothermal power via a network of dry sensors;
- Air via a free-chilling system;
- Biomass via micro-cogeneration systems;
- Heat recovery from sewage. □

DOBLE SMART GRID A ESCALA DE UNA MANZANA URBANA

LAURENT LE DEVEHAT, INGEROP - CHRISTOPHE RODRIGUEZ, DALKIA SMART BUILDING

El doble Smartgrid diseñado para el proyecto de rehabilitación urbana "Cœur de Quartier" en Nanterre (92) consta de:

- Una sala de calderas termofrigobomba y geotérmica que alimenta de calefacción, ECS y aire acondicionado para el conjunto del barrio;
 - Un bucle de la operadora que permite el autoconsumo de la electricidad producida localmente.
- Aprovecha 5 fuentes de energías renovables locales para alcanzar unos ambiciosos objetivos: 60% de energías renovables y de recuperación garantizadas a lo largo de 27 años:
- El sol mediante paneles fotovoltaicos;
 - La geotermia mediante una red de sondas secas;
 - El aire mediante un dispositivo de free-chilling;
 - La biomasa mediante micro-cogeneraciones;
 - La recuperación de calorías de las aguas residuales. □



1

© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA

FERME SOLAIRE DE COLEAMBALLY : LIVRAISON DE LA PLUS GRANDE FERME SOLAIRE D'AUSTRALIE

AUTEURS : FABRICE GEOFFROY, DIRECTEUR DE PROJET, BOUYGUES BÂTIMENT INTERNATIONAL - CYRILLE DE BARACE, MANAGER CONCEPTION, BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIE - YOANN PRUVOST, MANAGER MISE EN OPÉRATION, BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIE

ENTRÉE EN EXPLOITATION EN NOVEMBRE 2018, LA FERME SOLAIRE DE COLEAMBALLY EN NOUVELLE-GALLES DU SUD FIXE DE NOUVEAUX RECORDS NATIONAUX EN TERMES DE CAPACITÉ DE PRODUCTION (150 MW), RAPIDITÉ D'EXÉCUTION ET CONNEXION AU RÉSEAU NATIONAL. LE PROJET, UNE FERME SOLAIRE DE 550 HECTARES COMPRENANT PLUS DE 567 000 PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES MONTÉS SUR TRACKERS ORIENTABLES, A ÉTÉ CLÔTURÉ FINANCIÈREMENT EN JANVIER 2018, ET LE PROGRAMME DE CONCEPTION ET CONSTRUCTION LIVRÉ PAR BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA POUR NEOEN EN MOINS DE DIX MOIS.

Le secteur de l'énergie solaire en Australie connaît une croissance très rapide, grâce à un taux d'ensoleillement parmi les plus élevés au monde (plus de la moitié du territoire dépasse 2 100 kWh/m²), couplé à une politique de développement affirmée qui se compose de tarifs d'achat garantis, de nombreux appels d'offres, de soutien à la recherche, etc.

En 2017, quatre pays concentraient les deux tiers de la puissance installée photovoltaïque mondiale : la Chine

1- Vue d'ensemble de la ferme solaire de Coleambally.

1- General view of the Coleambally solar power farm.

(32%), les États-Unis (13%), le Japon (12%) et l'Allemagne (10%). L'Australie se classe au neuvième rang mondial avec 1,8%, et la part solaire représente

près de 4% de la production d'électricité nationale fin 2017. L'Agence internationale de l'énergie prévoit que la part du solaire photovoltaïque dans la production mondiale d'électricité pourrait atteindre 16% en 2050.

La production d'électricité est un enjeu majeur pour l'Australie. En effet, avec plus de 80% de la production d'électricité qui provient d'énergies fossiles, principalement du charbon, le secteur représente à lui seul plus de 30% des émissions de gaz à effet de serre du

pays. La multiplication des projets de construction de fermes solaires répond donc à un impératif de transition vers des sources d'énergie plus propres. L'enjeu est double :

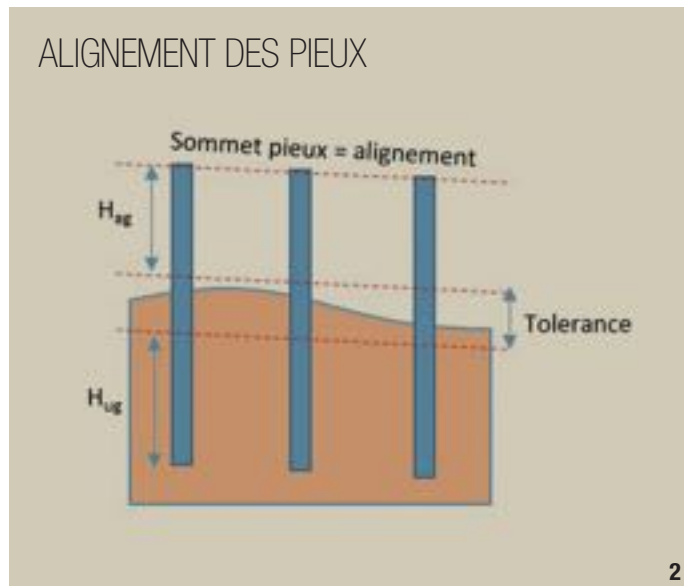
→ Contrer le surenchérissement de la facture au particulier, due à la fermeture progressive des centrales à charbon ;

→ Incrémenter la part de production d'énergie solaire renouvelable en profitant des atouts nationaux que sont l'espace et l'ensoleillement. ▷

La ferme solaire de Coleambally (figure 1), projet attribué en décembre 2017 par Neoen à Bouygues Bâtiment International et Bouygues Énergies et Services à travers la filiale Bouygues Construction Australia, est à ce jour la plus grande ferme solaire en activité dans l'État de la Nouvelle-Galles du Sud, à environ 400 km de Canberra / 700 km de Sydney.

La signature du marché s'est déroulée en deux temps, avec un premier contrat de travaux préparatifs signé en octobre 2017, incluant les accès au site, des tests de battage de pieux et les premiers achats de matériaux. Le second contrat, un contrat de conception-construction dit "Engineering, Procurement and Construction" (EPC), signé en décembre 2017, comprend toutes les étapes du design/dimensionnement à la construction, en passant par la mise en service et la connexion au réseau, ainsi que la livraison clés en main.

Soulignons que le marché de la construction de fermes solaires est extrêmement concurrentiel. Nous sommes sur un marché mondial, où le prix du Watt-crête (Wc, l'unité de mesure de puissance d'un panneau solaire) construit en Australie est comparé à un prix du Wc en Espagne, au Chili ou aux États Unis. Autre particula-



© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA

rité, les coûts sont concentrés à 60% sur trois achats : les modules, les trackers et les onduleurs, sur lesquels tous les acteurs ont les mêmes niveaux de prix, ce qui oblige à optimiser au plus juste sur le reste, à savoir le matériel électrique, les fondations, les travaux civils, mécaniques et électriques, ainsi que les délais. Cette optimisation commence par la conception de la ferme solaire.

2- Alignement des pieux.

3 & 4- Connexions électriques des panneaux à la distribution.

2- Pile alignment. 3 & 4- Electrical connection of panels to the distribution system.

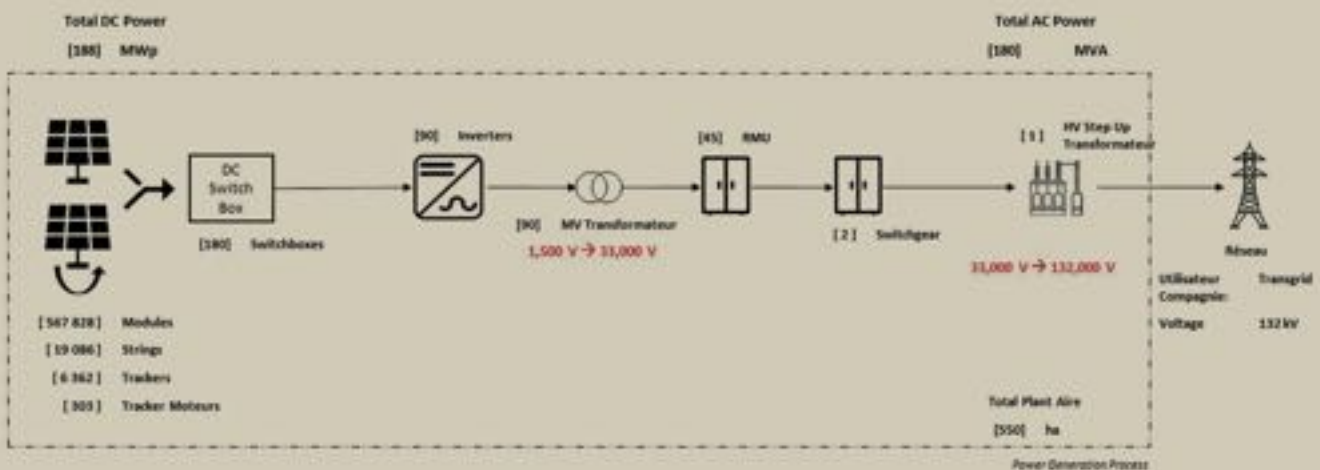
CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT LES FONDATIONS

Cette phase débute par le dimensionnement des fondations (pieux), qui se fait par une combinaison d'études géotechniques et de tests en situation réelle. Les structures reposent sur des pieux de section américaine (w6x9) enterrés à une profondeur de 1,5 à 2,0 m à l'aide de batteuses spécifiques. Des tests de battages de pieux sont réalisés sur le site, où l'on procède à l'enregistrement de la vitesse d'enfoncement, et à des tests d'arrachement verticaux et horizontaux pour des pieux. L'objectif est de réduire les coefficients d'incertitude dictés dans l'AS2159 et d'optimiser la longueur d'acier.

À Coleambally, ces tests ont permis d'optimiser les pieux de 20 cm, soit 230 t d'acier en moins. D'autres facteurs sont étudiés en priorité pour minimiser la section et la longueur des pieux :

- Une topographie détaillée permet de prédire les ondulations du terrain sous les rangs de trackers et de dimensionner au plus juste la longueur des pieux ;
- L'agressivité du sol permet de prédire la diminution d'acier due à la corrosion sur les trente ans de durée de vie de l'ouvrage ;

CONNEXIONS ÉLECTRIQUES DES PANNEAUX À LA DISTRIBUTION



3

© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA



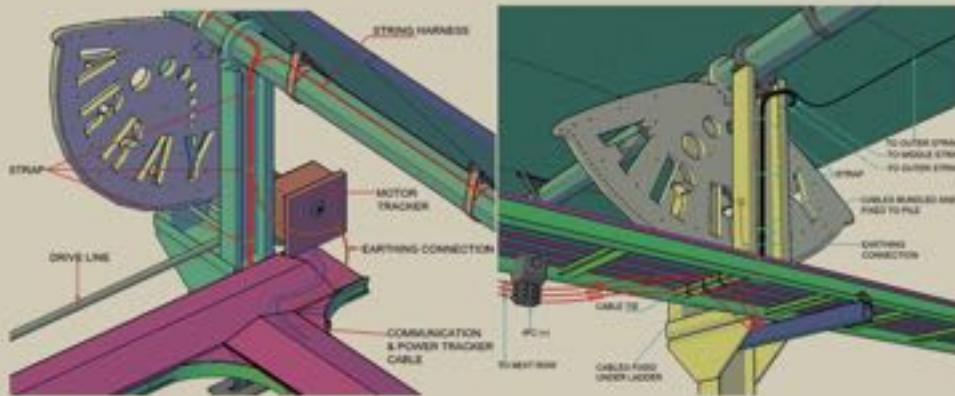
4

© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA

RÉTICULATION DES CÂBLES DC ET ÉCHELLES À CÂBLES SOUS LES TRACKERS

© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA

5



→ L'expansivité du sol permet de quantifier la poussée du sol lorsque l'argile mouillée gonfle, et la profondeur d'ouverture des craquements lorsqu'elle sèche et se craque.

La position de chacun des pieux en XYZ est calculée afin de garantir l'alignement de chaque rang tout en garantissant un respect des critères de conception (profondeur minimale, hauteur hors sol minimale et maximale).

La planéité est également un facteur important, la tolérance maximale étant

5- Réticulation des câbles DC et échelles à câbles sous les trackers.

6- Battage de pieux.

7- Trackers.

5- Cross-linking of DC cables and cable ladders under the trackers.

6- Pile driving.

7- Trackers.

de 30 cm sur la longueur d'une rangée de 90 m, d'où la nécessité de prévoir le plus souvent des travaux de terrassement et nivellement (figure 2).

LA RÉTICULATION DC/AC

Le schéma électrique consiste en une concentration successive de puissance, des panneaux jusqu'à la sous-station (figures 3 & 4).

La concentration de la puissance DC (courant continu) se fait traditionnellement dans des boîtes de jonctions.

Ici, une option différente a été choisie : l'utilisation de connecteurs isolants, installés au milieu de chaque rangée de trackers, permet de concentrer la puissance de chaque rangée le long d'un bus DC hors sol, pour une optimisation de près de 400 km de câbles sur le projet. Les IPC choisis sont à serrage couple cassant, minimisant le temps d'installation et garantissant de fait la qualité de la connexion au réseau. Il faut noter que l'achat d'IPC se fait à moindre coût par rapport aux boîtes de jonctions.

Les bus DC étant hors sol et non en tranchée, il a fallu installer 50 km d'échelles à câbles proches du sol afin de maintenir les câbles et les protéger des oiseaux et des rayons UV (figure 5).

LES PROBLÉMATIQUES RÉSEAU

L'Australie a la particularité d'avoir un réseau très étendu, rendu fragile par une demande faible et parsemée sur un grand territoire.

Les dirigeants politiques, les régulateurs et les opérateurs de réseaux sont extrêmement attentifs à l'impact des générateurs renouvelables sur le réseau, non seulement du fait de la puissance du lobby du charbon, mais aussi de pannes de courant générales (grand black-out de 2016 en Australie du Sud). ▷



6

© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA © NEON



7

© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA © NEON



À la différence d'un générateur synchrone basé sur une machine tournante, une ferme solaire se base sur de l'électronique de puissance convertissant du courant continu en alternatif. L'inertie mécanique d'une turbine permet d'absorber les variations de voltage et de fréquence du réseau. Cette compensation peut être fournie dans le cas d'une ferme solaire avec la fourniture d'une réserve de puissance réactive, qui permet dans le cas d'une baisse de voltage sur le réseau de maintenir une puissance de génération continue et ininterrompue.

Sur la ferme solaire de Coleambally, Bouygues Construction Australia a fourni 20 % d'onduleurs supplémentaires (180 MVA d'onduleurs, pour 150 MWac au point de connexion), ainsi que 25 % de puissance réactive pure (deux bancs de capacité de 19 MVar chacun, afin de répondre aux règles de stabilité des générateurs australiens).

Un onduleur approxime une sinusoïde mais n'arrive pas à fournir une courbe de puissance aussi lisse qu'une turbine, qui va fournir courant et voltage selon une sinusoïde presque parfaite. Ces imperfections vont se propager sur le réseau, pouvant créer des à-coups et endommager les équipements qui y sont connectés.

L'opérateur de réseau a émis des limites strictes sur la quantité d'harmoniques (défauts sur la sinusoïde) que la ferme solaire de Coleambally peut émettre, d'où l'ajout de deux filtres harmoniques combinant des condensateurs et résistances, et qui filtrent les défauts sur une fréquence spécifique.

LA "REGISTRATION", L'ÉTAPE DE L'ENREGISTREMENT DU PROJET

L'Australian National Electricity Rules (NER) exige de chaque producteur de soumettre un ensemble complet d'études, de logiciels de modélisation et de documentation afin d'obtenir le droit de générer de l'électricité sur le réseau et d'être enregistré en tant que producteur. Ce processus d'enregistrement a pour but de montrer que le parc solaire sera en mesure de respecter les exigences du réseau (comportement des onduleurs, fonctionnement continu sans interruption en cas de chute de tension ...), qui sont énumérées et convenues dans les accords de performance du générateur (GPS).

RÉALISATION DE LA FERME SOLAIRE

Cette réalisation s'est déroulée en différentes étapes. Après trois mois

8- Installation de modules ou panneaux solaires.

9- Medium Voltage Power Station.

8- Installation of solar modules or panels.

9- Medium Voltage Power Station.

d'activités préliminaires d'accès au site et de nettoyage de la parcelle, anciennement cultivée et traversée par des canaux d'irrigation, les travaux civils ont débuté en janvier 2018 pour une période de deux mois. Ces travaux comprenaient l'établissement d'une clôture d'un périmètre de 17 km ainsi que 22 km de voiries intérieures

réalisées en graves compactées non-traitées. C'est également durant cette période qu'ont débuté les premières livraisons de matériel, la partie logistique étant stratégique dans ce type de projet. Un projet de l'envergure de Coleambally représente près de 2500 camions reçus sur le chantier en trois mois, à répartir sur une parcelle de 500 ha, exigeant d'optimiser les zones de livraison, stockage et l'aire de montage afin de limiter les pertes de temps en doubles manipulations.

Vient ensuite six mois de travaux entre installation des pieux, montage des trackers et modules, câblage, installation de la sous-station principale et des sous-stations intermédiaires, avant la mise en service.

LES PIEUX MÉTALLIQUES

Les pieux métalliques en acier galvanisé, de type "I", battus à l'aide de machines hydrauliques de type 1350J,





© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA © NECOEN

10

d'une longueur de 2,5 à 3,5 m pour un enfoncement de 2 m (figure 6), la cadence de production journalière sur ce type de sol alluvionnaire atteint 150 à 170 u par jour et par machine. Des règles strictes de contrôle et d'acceptation sont mises en place avec des tolérances minimales en coordonnées X, Y, Z de l'ordre du centimètre. Le positionnement initial est assuré par un géomètre au moyen de coordonnées GPS. Au total 82 706 pieux seront installés en moins de trois mois.

LES TRACKERS

Les trackers : le modèle choisi est un modèle américain ATI à axe simple (figure 7), évoluant d'est en ouest afin de suivre la position du soleil au cours de la journée. Cette technologie représente le meilleur compromis entre plusieurs considérations, de l'amélioration des rendements au coût majeur en passant par l'encombrement du

sol, et permet d'optimiser la captation du rayonnement solaire par le tracker. Au total, la ferme solaire de Coleambally se compose de 6 382 rangées de trackers, longues de 90 m, raccordées entre elles et connectées à un moteur électrique ajustant l'orientation en fonction de la position du soleil. Le montage mécanique est une activité manuelle qui doit être coordonnée avec les mou-

10- Sous-station 132 kV/ 33 kV réalisée par CPP.
11- Recyclage de palettes.

10- 132 kV/33 kV substation executed by CPP.
11- Pallet recycling.

vements d'engins d'approvisionnement et le lavage des pieux dans un espace étroit, ce qui exige une gestion attentive des risques en matière de sécurité.

LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES (PV)

Reliés entre eux et connectés à des sous-stations électriques (MPVS), ce sont eux qui convertissent la lumière entrante en énergie électrique. Au total, 567 828 modules ont été installés sur le site de Coleambally. Deux types de modules ont été posés : les modules poly-cristallins (généralement de couleur bleue) de puissance unitaire 325 et 330W, et les modules monocristallins (généralement de couleur noire) de puissance unitaire 345W. Chaque rangée de trackers dispose de 90 panneaux, selon un montage simple de clips et vis de serrage. La cadence quotidienne de montage s'établit à 180 panneaux par jour et par ouvrier.

LES SOUS-STATIONS

Les postes MV (Medium Voltage Power Station, figure 9 et Sous-station 33kV/132kV, figure 10) : Au nombre de 45, les postes MV comportent un RMS, deux transformateurs 1500/33 kV et deux onduleurs SC200 de 2 MW chacun. Après montage des skids (structures métalliques similaires à des containers, livrées en kits), ils sont connectés par groupes de trois ou quatre pour composer douze circuits (feeders), lesquels sont câblés en tranchées jusqu'à la sous-station principale.

La construction d'une ferme solaire est une course contre la montre entre des chantiers signés avec un planning extrêmement serré, des contraintes de date de connexion au réseau et des pénalités de retard importantes. Deux facteurs cruciaux entrent alors en compte : la main d'œuvre et la phase de mise en service/connexion au réseau.

LA MAIN D'ŒUVRE

Tout au long du chantier, Bouygues Construction Australia s'est engagé auprès de la communauté de Coleambally, attachant une importance particulière à la réduction maximale des impacts sur l'environnement, au respect des traditions aborigènes, notamment à travers la cérémonie "Welcome to the country", ou encore à l'organisation de visites de chantier pour des associations, écoles ou media locaux. Bouygues Construction Australia s'est également attaché à favoriser l'emploi local, en faisant appel à 80 électriciens locaux sous certification pour réaliser l'ensemble des activités électriques. La ferme solaire de Coleambally a nécessité 450 ouvriers au pic d'activité.

PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Avec une capacité de production de 390 000 MWh par an, la ferme solaire de Coleambally permet d'alimenter en énergie propre plus de 50 000 foyers, contribuant de manière significative à la réduction des gaz à effet de serre, à hauteur d'une diminution de 300 000 t par an. C'est l'équivalent de 90 000 véhicules en moins sur les routes australiennes, ou de 530 000 arbres plantés dans le pays.

Au-delà de la production, le chantier d'une ferme solaire est une source importante de recyclage : 25 000 palettes ont été déchetées sur site et réutilisées pour favoriser le développement de la végétation. 300 t de cartons et 100 t d'acier ont également été recyclés.



© BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIA

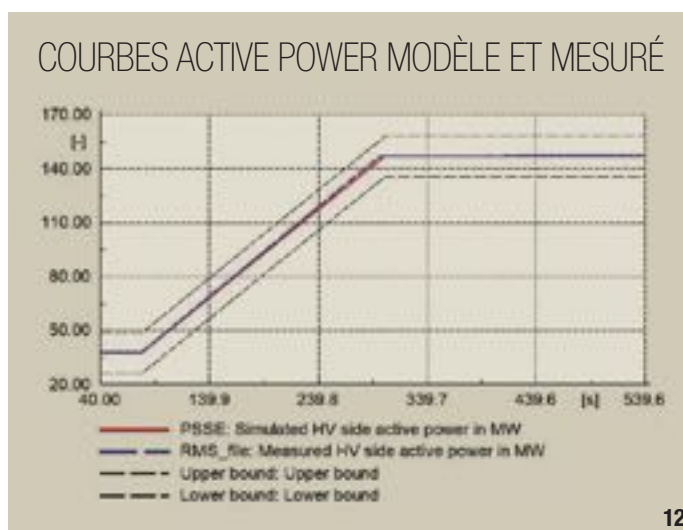
11

LA MISE EN SERVICE

La mise en service a pour but de tester l'ensemble du parc solaire de Coleambally et de démontrer sa conformité avec le modèle GPS enregistré.

Un plan de test a été convenu en coordination avec Transgrid, opérateur de réseaux, et l'Australian Energy Market Operator (organisme responsable de l'administration de l'opération du marché de l'électricité au niveau national). Divisé en trois points de maintien, respectivement à 33%, 66% et 100% de la puissance, le plan de test se décompose en plusieurs tests dits "R2 - Model Validation Tests" qui visent à démontrer la bonne précision des modèles de logiciels (PSS/E, PSCAD). Trois mois furent nécessaires afin de procéder à tous les tests et vérifications, chacune des trois étapes étant soumise à approbation avant le passage à la suivante.

Pour finir, le système est soumis à un test d'opération à pleine puissance pendant une période test de 10 à



14 jours, afin d'en vérifier la stabilité et la fiabilité.

La soumission finale, dite "R2 - Final Report" consiste à fournir les modèles finaux PSSE et PSCAD à Transgrid et l'AEMO.

12- Courbes Active Power modèle et mesuré.

12- Model and measured Active Power curves.

Tout ce processus a été réalisé par l'équipe de mise en service de Bouygues Construction Australia, tandis que les analyses et les superpositions de modèles ont été effectuées par DigSilent.

Bouygues Construction Australia est désormais en charge de l'exploitation et de la maintenance de la ferme solaire de Coleambally.

Il est important de préciser que Bouygues Construction possède une expertise reconnue par les clients internationaux dans le secteur du photovoltaïque.

Ainsi, outre la ferme de Coleambally (188 MW), Bouygues Énergies & Services est présent sur trois autres sites en Australie (pour une capacité de 269 MW), au Royaume-Uni (108 MW), en France (834 MW), sur l'Île Maurice (17,7 MW), au Japon (55 MW), en Thaïlande (69 MW), au Vietnam (250 MW) et aux Philippines (132,5 MW). Le groupe totalise environ 1 934 MW de panneaux photovoltaïques déjà installés dans le monde. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

MONTANT DES TRAVAUX : 249 000 000 \$Aus, 160 505 400 € HT

PUISSANCE INSTALLÉE : 188 MWp, et délivrée 150 MW

PANNEAUX SOLAIRES : 567 828 u

PIEUX MÉTALLIQUES BATTUS : 82 706 u

RANGÉES DE TRACKERS DE 90 m : 6 362

CÂBLES : 1 250 km

TRANCHÉES : 21 km

MEDIUM VOLTAGE STATION (SOUS STATION) : 45

(soit 90 transformateurs et 90 onduleurs)

CLÔTURE GRILLAGÉE : 17 km

PARCELLE : 550 ha, 22 km de routes en graves compactées non traitées

RECYCLAGE : 300 t de cartons, 25 000 palettes

LOGISTIQUE : 2 500 containers reçus

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : NEOEN

CONCEPTION CONSTRUCTION : Bouygues Construction Australia (partenariat Bouygues Bâtiment International et Bouygues Énergies & Services)

RÉSEAU RÉGIONAL D'ÉLECTRICITÉ : Transgrid (principal exploitant et gérant du transport d'électricité en Nouvelle-Galles du Sud et dans le Territoire de la capitale australienne)

RÉSEAU NATIONAL D'ÉLECTRICITÉ : Australian Energy Market Operator - AEMO (responsable de l'administration et opération du marché de l'électricité au niveau national)

SOUS STATION PRINCIPALE : Consolidated Power Project - CPP

FOURNITURE DE PANNEAUX SOLAIRES : JA & Jinko, origine Chine

FOURNITURE DE TRACKERS : Ati, origine USA

FOURNITURE DE MVPS : Schneider Electric, origine Espagne, Indonésie

ABSTRACT

COLEAMBALLY SOLAR POWER FARM: DELIVERY OF THE LARGEST SOLAR POWER FARM IN AUSTRALIA

F. GEOFFROY, BOUYGUES BÂTIMENT INTERNATIONAL - C. DE BARACE, BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIE - Y. PRUVOST, BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIE

Bouygues Construction Australia (BYCA - a subsidiary of Bouygues Travaux Publics, Bouygues Bâtiment International and Bouygues Énergies & Services) has delivered the new Coleambally solar power farm in Australia. The site, located 400 km from the capital, spreads over 550 hectares and comprises 567,828 solar panels of total capacity 188 MW. This project confirms that the Australian authorities want to increase the proportion of renewable energies in the country's electricity production. This project is currently the national benchmark with regard to production capacity and speed of implementation. Under a Design and Build contract, BYCA carried out design engineering, construction, commissioning and connection to the grid, and will also perform operation of the facility over the coming years. □

GRANJA SOLAR DE COLEAMBALLY: ENTREGA DE LA MAYOR GRANJA SOLAR DE AUSTRALIA

F. GEOFFROY, BOUYGUES BÂTIMENT INTERNATIONAL - C. DE BARACE, BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIE - Y. PRUVOST, BOUYGUES CONSTRUCTION AUSTRALIE

Bouygues Construction Australia (BYCA, filial de Bouygues Travaux Publics, Bouygues Bâtiment International y Bouygues Energies & Services) entregó la nueva granja solar Coleambally en Australia. Situada a 400 km de la capital, cubre 550 hectáreas con 567.828 paneles solares instalados con una potencia de 188 MW. Este proyecto confirma la voluntad de las autoridades australianas de desarrollar la parte de energía renovable en la producción de electricidad del país. Actualmente, este proyecto es el punto de referencia nacional en términos de capacidad de producción y velocidad de ejecución. Por medio de un contrato de diseño y construcción, BYCA se ha encargado de los estudios, la construcción, la puesta en servicio y la conexión a la red, y también operará el sitio durante los próximos años. □



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

SANTÉ

PRÉVOYANCE

RETRAITE

ÉPARGNE

ASSURANCES

ACTION SOCIALE

VACANCES

 **PRO BTP**
GROUPE

SMAVIE

**POUR FIDÉLISER ET
MOTIVER VOS SALARIÉS,
PENSEZ À LEUR RETRAITE**

Vos salariés se préoccupent de leur avenir ? Aidez-les à préparer leur retraite dans le cadre de votre entreprise.

Que ce soit en épargne-retraite, santé ou prévoyance, votre conseiller SMAvie vous accompagne pour trouver le meilleur pour vos salariés et votre entreprise.

SMAvie, mon assureur pour la vie
www.smavie.fr

- ✓ Associez vos salariés à la réussite de votre entreprise avec l'épargne salariale
- ✓ Proposez leur une épargne-retraite solide et performante
- ✓ Choisissez des solutions adaptées à votre entreprise tout en allégeant vos charges*

Téléchargez notre application

SMAvie
INFOS

*Dans les limites et conditions de la législation en vigueur.

SMA SMAvie BTP: société d'assurance mutuelle à cotisations fixes, entreprise régie par le Code des assurances
RCS PARIS 775 684 772 - 8, rue Louis Armand - CS 71201 - 75738 PARIS Cedex 15

Document publicitaire
Sans valeur contractuelle