

L'ARCHE DE TCHERNOBYL, UNE IMPLICATION EXEMPLAIRE DES ENTREPRISES FRANÇAISES

Laurent BOUTILLON, Marc WASTIAUX

VINCI Construction Grands Projets

David COULET

Bouygues Travaux Publics

LE CONTEXTE D'UN PROJET HORS NORMES

Après l'accident de Tchernobyl, le 26 avril 1986, et la construction du premier sarcophage dans l'année suivante, les deux entreprises françaises se sont intéressées aux phases de concours dès 1992 et à l'appel d'offres de 2004 qui a suivi la création du Tchernobyl Shelter Fund, émanant du G7 et administré par la BERD (*figure 1*).

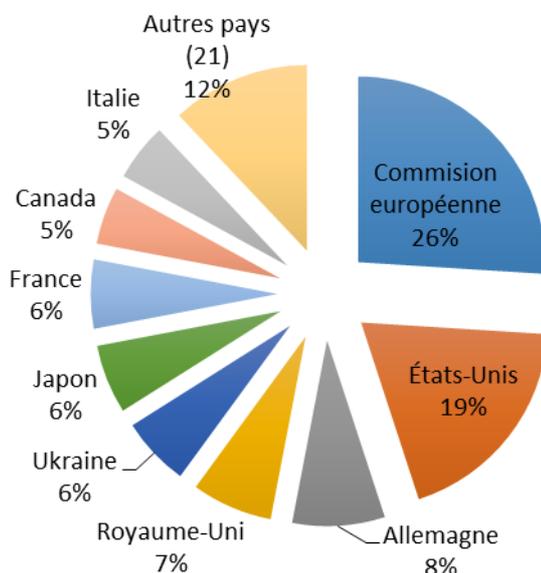


Figure 1 - Répartition des fonds

L'appel d'offres spécifiait des fonctions et certaines performances, sans définir de conception précise. L'arche appelée officiellement *New Safe Confinement* (NSC) devait supporter l'outil de démantèlement, assurer le confinement (vis-à-vis des travailleurs, du public et de l'environnement) et permettre la mise en sécurité de l'installation. Et l'ensemble devait être conçu et construit conformément aux normes ukrainiennes, dérivées de l'ancien système soviétique. Tout restait à faire (*figure 2*). Fin 2007, le marché était signé.



Figure 2 - Réacteur 4 accidenté et emplacement définitif de l'arche matérialisé en rouge



La structure NSC dans sa configuration finale a une portée de 257 m, une longueur de 162 m et une hauteur de 108 m. Le poids total est de 36 000 t au moment du transfert final. La longueur totale des fondations, y compris les zones de construction, de transfert et de service, est de 500 m.

La structure doit résister à tous les événements extérieurs, avec une probabilité d'effondrement inférieure à 10^{-7} par an, et doit avoir une durabilité supérieure à 100 ans, avec une maintenance minimale.

Le projet comprend, au total, 19 sous-structures ou systèmes parmi lesquels (*figure 3*) : fondations spécifiques, structure en acier singulière, double bardage spécifique, ponts roulants hors-normes, ventilation multifonctions, sécurité incendie, alimentation électrique secourue, traitement des eaux, suivi radiologique, surveillance structurelle et sismique, communications, CCTV, système de contrôle intégré, bâtiments technologiques et auxiliaires, etc.

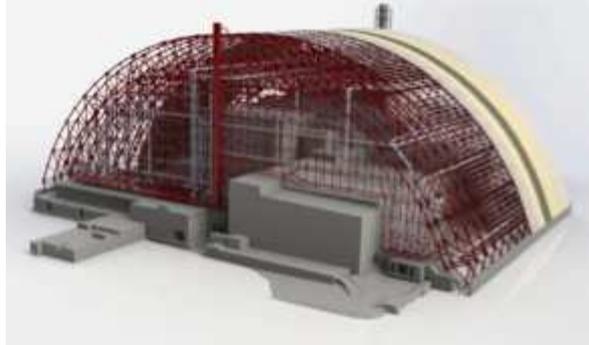


Figure 3 - Sous-structures ou systèmes de l'arche

UNE MULTITUDE D'ACTEURS

L'organisation du projet est complexe, un *Project Management Unit*, piloté par Bechtel qui assure le rôle de l'ingénieur au sens FIDIC, un client administratif, la CHNPP (centrale nucléaire de Tchernobyl chargée de la surveillance et de la déconstruction), un régulateur, le SNRIU (State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine), un administrateur du fonds spécial, la BERD (banque européenne pour la reconstruction et le développement) et une entreprise chargée du contrat clé-en-main, NOVARKA (joint-venture entre VINCI Construction Grands Projets et Bouygues Travaux Publics). Sont aussi concernés, les ingénieries locales et de nombreux sous-traitants internationaux.

DES INNOVATIONS À TOUS LES NIVEAUX

- Des fondations en zone contaminée soumises à des efforts horizontaux importants
Les choix réalisés ont visé à la minimisation des déblais et à la réduction des temps d'exposition, tout en respectant des conditions limites de vibrations draconiennes.

Un cahier des charges, au niveau des fondations, très spécifique :

- Sables de densité moyenne, en partie remblayés après l'accident et potentiellement contaminés
- Présence d'obstacles enterrés, notamment d'anciennes conduites d'eau de refroidissement
- Nappe phréatique à 4 m de profondeur
- Efforts horizontaux importants (1 000 kN horizontal pour 4 000 à 5 000 kN vertical en ULS)
- Contraintes de site, notamment limitation des vibrations, degré d'exposition aux radiations des personnels pour les pieux de service (3 h de travail par jour au maximum)
- Géométrie permettant le transfert de l'arche

Le choix s'est porté, pour :

- La zone de montage (*figure 4*), à plus de 100 m du sarcophage existant, sur des pieux battus d'un diamètre de 1m, d'une longueur battue de 24 m et avec un diaphragme interne à mi-hauteur pour mobiliser l'effet de pointe
- La zone de transfert (*figure 5*), sur des semelles superficielles
- La zone de service (*Figure 6*), sur des pieux à tarière continue d'un diamètre de 1 m et d'une longueur de 20 m. Avec, dans la partie Sud, des pieux réalisés à l'intérieur de double chemisage de tête, à proximité des anciennes conduites de refroidissement enterrées

Chacune des deux fondations de 500 m de longueur est découpée en tronçons reliés entre eux par des clés, qui permettent la dilatation tout en bloquant les déplacements verticaux et transversaux. La face supérieure des semelles est inclinée d'environ 30° de façon à être perpendiculaire la poussée moyenne de l'arche.

Les pieux ont fait l'objet de nombreux tests de chargements verticaux (dont certains sur les pieux de service) et horizontaux.

Les pieux CFA (Figure 7) sont monitorés par le système Lutz et contrôlés en impédance et essais soniques.



Figure 4 - Les fondations dans la zone de montage



Figure 5



Figure 6



Figure 7

- Une conception et un levage de la structure métallique adaptés.

La zone de montage est à 300 m en recul par rapport à l'ouvrage existant de façon à réaliser la majorité des travaux en zone aux débits de dose limités. Le levage, quant à lui, se fait en 3 fois, par demi-arche et en commençant par le centre. Les assemblages sont, par ailleurs boulonnés, toujours en vue de minimiser l'exposition des personnels.

La géométrie de l'arche, orientée dans l'axe Est-Ouest est conditionnée par celle du sarcophage existant ainsi que par les contraintes géométriques des ponts roulants suspendus au plafond pour permettre les futurs travaux de démantèlement. En résultent, une portée de 257 m et une hauteur de 108 m (figure 8).

La structure est constituée de 16 arches élémentaires, articulées en pied. Les paires d'arches d'extrémité constituent la structure des murs. La partie centrale des arches portant les rails des ponts roulants est à plus forte inertie.

Le pignon Est (appelé mur Est) est entièrement suspendu. Le mur Ouest, quant à lui, est buté en pied en service. Les efforts longitudinaux d'ensemble dans le sens Est-Ouest sont repris par les appuis centraux de l'arche.

Les cas dimensionnant sont, vers le bas, la neige cumulée à l'effet des ponts roulants et, vers le haut, la tornade de classe 3 qui génère une dépression maximale de 13 kN/m².

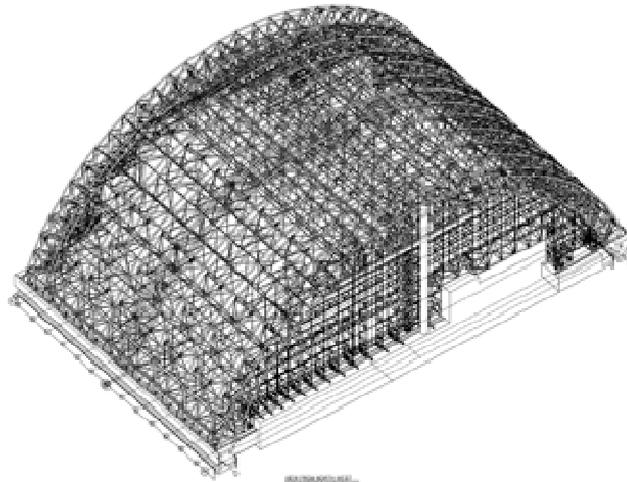


Figure 8 - Charpente métallique de l'arche



La méthode de levage en 3 fois (*Figures 9a et 9b*) en commençant par le centre est dictée par la moindre exposition des personnels (le niveau radiologique augmente avec l'altitude) et une meilleure sécurité. Les assemblages sont boulonnés (boulons HR de 30 mm, type TCB), la soudure in situ étant quasiment impossible compte tenu des conditions d'exposition et du climat. Les assemblages sont de type à éclisse. Par ailleurs, la structure a fait l'objet d'un montage à blanc virtuel (scan) en usine.



Figures 9a et 9b



Figure 9c - détail des nœuds d'assemblage des tubes métalliques

- Un confinement par bardage métallique léger
La création d'un espace annulaire en légère surpression au-dessus du volume principal, lui en légère dépression, permet d'alléger la structure (figure 10).

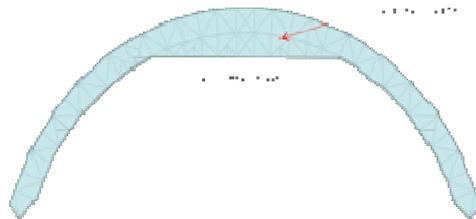


Figure 10

Les bardages extérieur et intérieur sont constitués d'une structure multicouche, chacune assurant une fonction précise. Ils ont fait l'objet de nombreux tests de validation en laboratoire, notamment pour la résistance à la dépression, aux impacts, à la fatigue et pour l'étanchéité à l'air.

Fonctions du bardage extérieur :

- Résister au vent, aux tornades (jusqu'à une dépression de 13 kN/m²)
- Supporter les effets de la neige (statiques et dynamiques)
- Résister aux impacts locaux
- Être étanche à l'air et à l'eau
- Être durable (100 ans) et avec un minimum de maintenance

Fonctions du bardage intérieur :

- Assurer le confinement des poussières radioactives
- Être étanche à l'air
- Être décontaminable (pouvant être décontaminé)
- Être résistant au feu
- Être durable (100 ans) et avec un minimum de maintenance

Par ailleurs, les parois externes de l'arche sont en acier inox pour assurer durabilité et résistance.

- Des portes rabattables à grande échelle.
Pour franchir le sarcophage existant et réaliser le raccordement à l'existant, des portes rabattables faisant jusqu'à 30 m de hauteur seront manoeuvrées après transfert.

La structure du sarcophage existant est en saillie par rapport aux structures permanentes. Il fallait donc concevoir des parties escamotables pendant le transfert pour modifier la géométrie du mur Est après son déplacement définitif. Ces portes ou panneaux rabattables (figure 11) sont constitués de la même structure que les murs, auxquels ils se raccordent par des joints étanches. Ils sont pivotés à l'aide de treuils et de vérins puis verrouillés en position à l'aide de vérins spécifiques équipés de leur propre centrale hydraulique.



Figure 11

- Une ventilation multifonctions
Une ventilation qui assure à la fois le confinement et la durabilité de l'ossature métallique par dessiccation.

Afin d'assurer le confinement semi dynamique, le principe a été de créer un espace annulaire en légère surpression. Cet espace d'un volume d'environ 1 million de m³ est la barrière qui empêche les poussières radioactives de migrer vers l'extérieur. De plus il est maintenu sous air sec à 40 % d'humidité relative, ce qui permet d'assurer la durabilité à long, voire très long terme de la charpente métallique de l'arche. L'ensemble des équipements E&M requis pour ce système de ventilation est porté par le mur Ouest et facilement accessible pour la maintenance. L'air sec est généré par le passage sur des roues dessiccantes économes en énergie.

Le volume principal, d'environ 1,4 million de m³ est maintenu en légère dépression. L'air passe par des filtres Très Haute Activité, arrêtant la quasi-totalité des poussières radioactives, avant d'être rejeté par la cheminée en inox suspendue à l'arche. Les équipements de ventilation du volume principal sont logés dans le bâtiment de traitement et bien accessibles pour la maintenance.

Près de 4 km de gaines sont installées dans le volume annulaire et le volume principal.

- Des ponts roulants hors normes
Afin de limiter les risques pendant la déconstruction, les ponts roulants télécommandés font la largeur de la zone de desserte, soit quasiment 100 m.

Les ponts roulants (figure 12a et 12b) télécommandés sont constitués de 2 structures bipoutres couvrant la largeur totale de démantèlement.

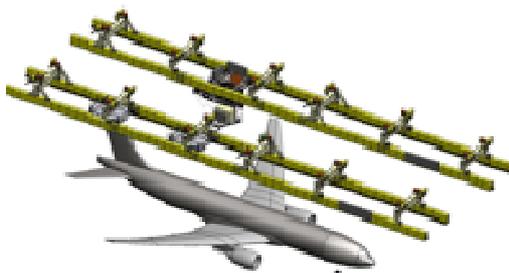


Figure 12a



Figure 12b



Sur ces « quadrilatères », plusieurs types de chariot sécurisés assurent dans un premier temps la déconstruction des gros composants (*figure 12c*). Un chariot à câbles à 6 degrés de liberté permet, ensuite, de porter les outils de déconstruction dans l'espace de travail en reprenant les forces verticales et horizontales (*figure 12d*). La maintenance des chariots s'effectue, quant à elle, dans un garage suspendu, protégé des radiations et bénéficiant d'un apport en air propre et en légère surpression par rapport au volume principal.



Figure 12c

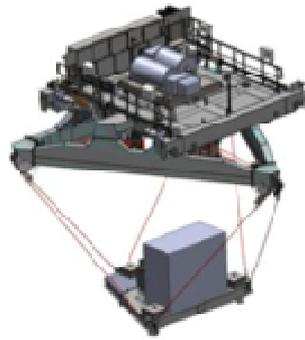


Figure 12d

- Des membranes d'étanchéité sur mesure
Les grands déplacements au niveau des murs pignons de l'arche ainsi que la réduction des efforts transmis par l'arche aux ouvrages existants ont nécessité la conception de membranes sur mesure.

Les membranes (*figure 13*) réalisent la connexion étanche de l'arche à l'existant, avec de multiples contraintes : grands déplacements relatifs de 1m dans toutes les directions, limitation drastique des efforts pour ne pas déstabiliser les structures en place qui sont fragiles et non propagation des déchirures en cas de tornade T3, durabilité et réparabilité. Le matériau choisi, à base de polyuréthane spécifique a fait l'objet de nombreux tests en laboratoire et en usine. Il est formé par projection avec l'aide d'un robot sur un moule. La forme à chevrons, brevetée, permet de limiter les efforts en distorsion.

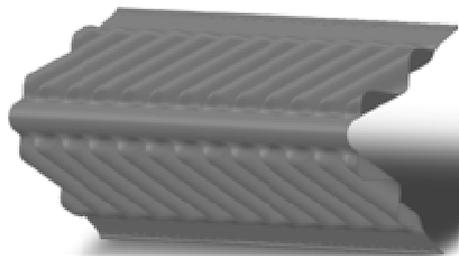


Figure 13

- Un système de transfert unique au monde
Le système permet de déplacer les 36 000 t de l'ensemble avec une précision de 5 mm à chacun des appuis.

L'arche est construite à 300 m du réacteur en 2 demi-arches. Une fois terminée, la première moitié est tout d'abord déplacée de 125 m afin de libérer la zone pour la réalisation de la seconde moitié, puis reculée de 25 m pour la réalisation de la liaison entre les deux demi-arches. Le tout assemblé est finalement ripé de 300 m jusqu'à l'emplacement définitif de l'arche (*figure 14*).



Figure 14

Pour ces opérations, chacun des 32 pieds de l'arche est supporté par 4 paires de vérins orientées perpendiculairement au chemin de glissement (incliné de 30° environ) et mu par 4 vérins pousseurs-tireurs automatiques. Chaque pied (*figure 15*) est équipé de sa propre centrale hydraulique. Les déplacements relatifs entre les pieds sont contrôlés par un système laser et par des cibles, le tout est piloté par un automate (*figure 16*).



Figure 15

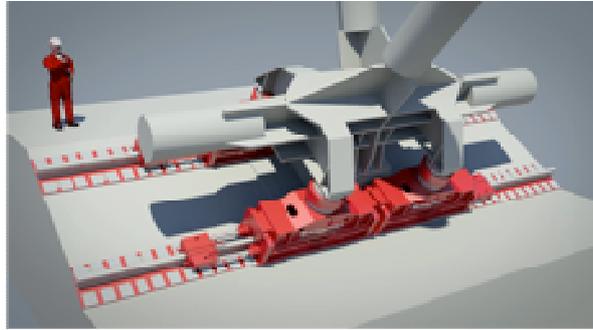


Figure 16 - système de ripage sous chacun des pieds de l'arche

Le système a été testé en grandeur nature, lors du premier ripage. Il permet une tolérance relative verticale de 5 mm. La vitesse de transfert après rodage est de 10 m par heure. Le glissement est assuré par un contact inox/téflon. En fin de transfert, le système est réglé à la côte théorique et les appuis définitifs (déjà en place mais non scellés) sont mis en contact.

LA STRATÉGIE POUR LA PROTECTION DES PERSONNES SUR LE SITE

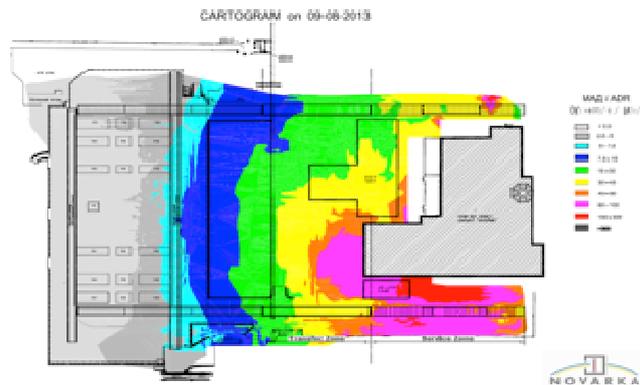
La conception a été pensée pour minimiser l'exposition des personnels durant la construction et l'opération du NSC. La stratégie a été de minimiser les doses à tout moment, avec comme objectif les 2/3 de la dose réglementaire annuelle de 20 milli sievert (*figures 17a, 17b et 17c*). Le nettoyage puis le bétonnage de la zone de montage ont, ainsi, permis de supprimer l'irradiation venant du sol.



(a)



(b)



(c)

Figures 17 - Equipement de radioprotection, dosimètre, cartographie des niveaux de radiation

CONCLUSION ET RETOUR SUR LES CONDITIONS D'UN SUCCÈS À L'INTERNATIONAL

C'est grâce à une implication et une bonne connaissance des acteurs que le projet a pu être mené à bien.

L'implication du personnel de NOVARKA a été à la hauteur de l'enjeu. Une organisation intégrée a été mise en place, adaptée à chaque phase du projet. Les habitudes et normes locales ont été respectées, avec l'aide d'instituts ukrainiens.

En particulier la phase de conception servant de base aux approbations du régulateur, équivalente à un APD très complet assorti des méthodes détaillées et finales a été respectée à la lettre.

Des réunions de suivi régulières entre NOVARKA, le PMU, les régulateurs et la banque ont permis de définir des objectifs communs et de résoudre les problèmes dans l'intérêt du projet.