

LES RÉSERVOIRS GNL DE YAMAL

Daniel CARDOUAT, William PASCHETTA

VINCI Construction Grands Projets



Table des matières

LES RESERVOIRS GNL DE YAMAL.....	1
1 PRÉAMBULE	3
2 CONCEPTION DE LA VARIANTE FONDATION	4
2.1 La solution du client.....	4
2.2 La variante du groupement d'entreprises	5
3 LES ETUDES D'EXECUTION.....	5
3.1 Contexte	5
3.2 Etudes des fondations	5
3.3 Études de l'enceinte en beton	6
3.3.1 Études sismiques.....	7
3.3.2 Études en situations normales.....	7
3.3.3 Études en situations exceptionnelles.....	8
4 REALISATION	9
4.1 Fondations par pieux dans le permafrost	9
4.2 Radier surélevé	10
4.3 Mur extérieur en outil glissant.....	11
4.4 Toiture dôme en béton	13

1 PRÉAMBULE

Au printemps 2013, le groupement d'entreprises VINCI Construction Grands Projets et Entrepose Projets a gagné l'appel d'offres pour la conception et la construction clé en main de quatre réservoirs de gaz naturel liquéfié (GNL) sur le site d'exploitation gazière de South-Tambey dans la péninsule de Yamal, en Sibérie, au nord du cercle polaire.

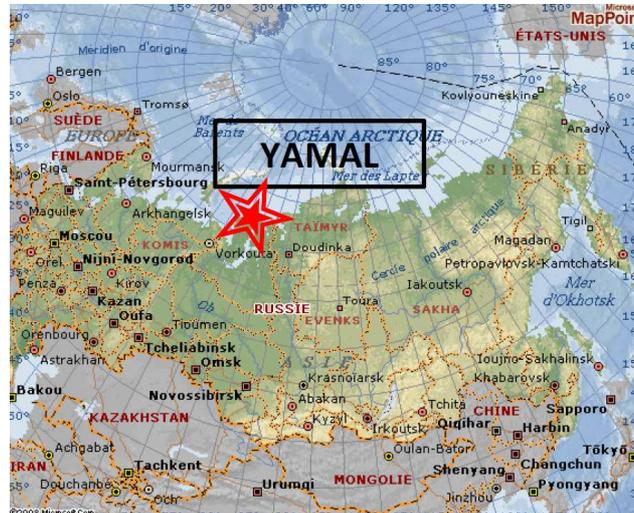


Figure 1 : le site de Yamal

Le contrat d'un montant initial de 1 165 millions de dollars US a été officiellement signé le 16 octobre 2013.

Ce succès est principalement dû à la présentation d'une variante technique sur les fondations engendrant pour le client, la société Russe JSC Yamal LNG, une économie financière substantielle, de l'ordre de 100 millions de dollars US, sans impact sur les délais de réalisation. Une livraison prévue des deux premiers réservoirs en novembre et décembre 2016, le troisième en novembre 2017 et le quatrième en novembre 2018.

Chaque réservoir GNL a une capacité de 170 000 m³. Sorte de « thermos » géant, il est constitué d'une enceinte extérieure en béton précontraint de 78,60 m de diamètre et 43 m de hauteur, surmontée d'un dôme en béton armé culminant à 53 m, d'un bac métallique intérieur qui contient le gaz naturel liquéfié à -163°C, et du complexe d'isolation thermique entre ces deux structures. Les pompes, tuyauteries et autres équipements nécessaires à l'exploitation des réservoirs font partie du contrat.

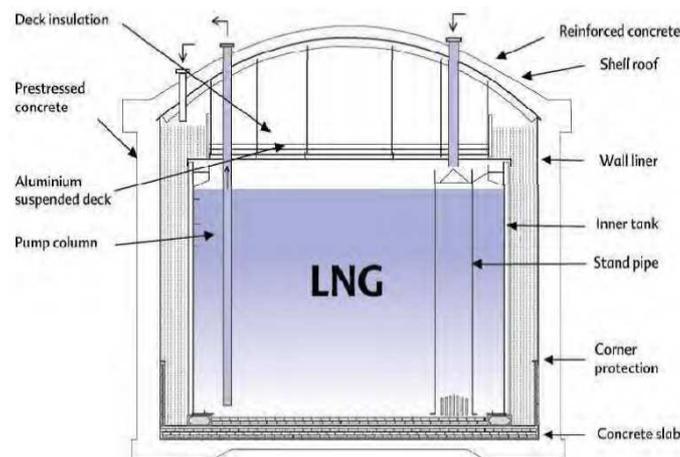


Figure 2 : schéma type d'un réservoir à intégrité totale (full containment)

L'ensemble de 140 000 t en charge est posé à 1,90 m au-dessus du sol sur 948 pieux métalliques de 24 m de longueur fondés dans le permafrost (ou pergélisol, terme géologique qui désigne un sol dont la température se maintient en dessous de 0°C pendant plus de deux années consécutives).



Le challenge a été de mettre en œuvre cette variante tant sur le plan conceptuel que dans sa réalisation pratique, dans un délai très court, à la très grande satisfaction du client, et ce malgré un environnement aux conditions bien souvent extrêmes, les températures pouvant descendre jusqu'à -50°C en hivers et la nuit polaire régnant de mi-novembre à mi-février.



Figures 3 : le chantier en février 2015

2 CONCEPTION DE LA VARIANTE FONDATION

2.1 LA SOLUTION DU CLIENT

La solution prévue par le client, au stade de l'appel d'offres, pour les fondations des réservoirs GNL de Yamal présentait les principales caractéristiques suivantes :

- 1365 pieux métalliques de 530 mm de diamètre, de 37 m de longueur pour une épaisseur de 20 mm (soit une longueur totale de 202 km pour les quatre réservoirs)
- 1365 appuis de type pendulaire placés en tête des pieux (5460 appuis pour les quatre réservoirs)
- Un ensemble très dense de liernes et de bracons liaisonnant la partie haute des pieux, placé dans l'espace libre de 1,90 m entre la sous-face du radier et le sol, et représentant un poids total de 550 tonnes pour les 4 réservoirs

À noter que les caractéristiques des pieux (pieux métalliques, diamètres et épaisseur) étaient imposées par le client qui en avait approvisionné plusieurs milliers pour l'ensemble des ouvrages du terminal gazier dont font partie les quatre réservoirs de GNL.

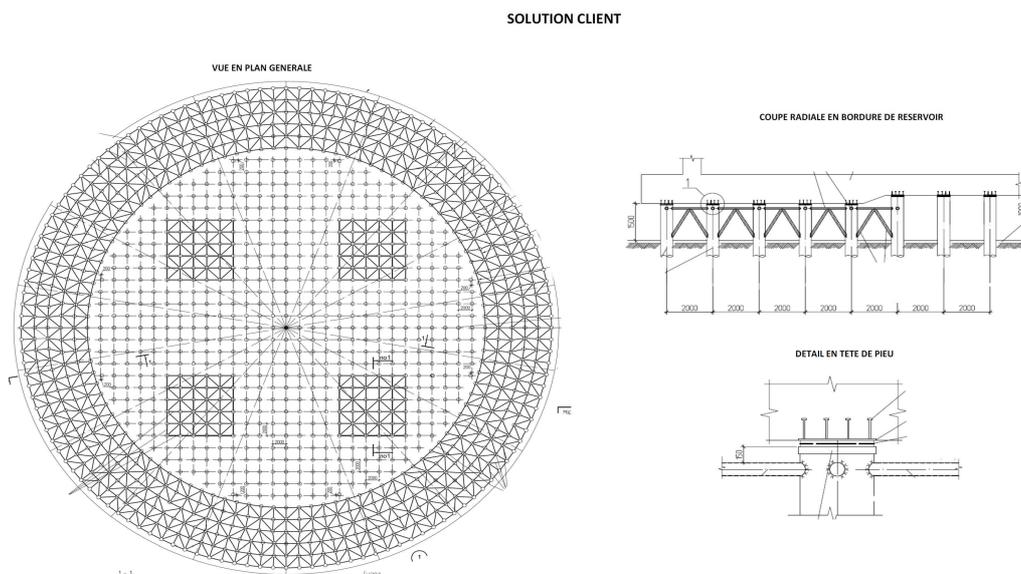


Figure 4 : principe des fondations de la solution du Client

2.2 LA VARIANTE DU GROUPEMENT D'ENTREPRISES

La solution alternative mise au point par le Groupement d'entreprises, au stade de l'appel d'offres, présente les principales caractéristiques suivantes :

- Grâce à une étude structurelle et géotechnique très fine, le nombre et la longueur des pieux ont été optimisés de façon très significative : le nombre de pieux est passé de 1365 à 948 (par réservoir) tandis que leur longueur unitaire a été réduite de 37 m à 24 m. Cela représente un gain de 111 km de pieux pour l'ensemble des quatre réservoirs, soit une réduction de 55 % des quantités de la solution du client.
- Les appuis pendulaires prévus dans la solution du client sont bien adaptés à des zones fortement sismiques mais ce n'est pas le cas dans la zone de la péninsule de Yamal. La variante a consisté à les remplacer par des appuis fixes sphériques (matérialisant une rotule) nettement moins onéreux.
- Grâce à ce changement de type d'appuis, les pieux n'ont plus besoin d'être reliés en tête par le système de liernes et de butons de la solution du client puisqu'ils sont liés au radier par les appuis fixes sphériques. La suppression de cette charpente métallique complexe a généré une économie de 550 t d'acier et un gain de planning significatif. Elle a également permis une meilleure circulation du flux d'air froid sous le réservoir, favorisant ainsi un meilleur fonctionnement du système de thermo-stabilisation (dispositif spécifique permettant de maintenir le Permafrost à une température suffisamment froide, de manière à assurer la capacité portante des pieux durant 50 ans, durée de vie des ouvrages).

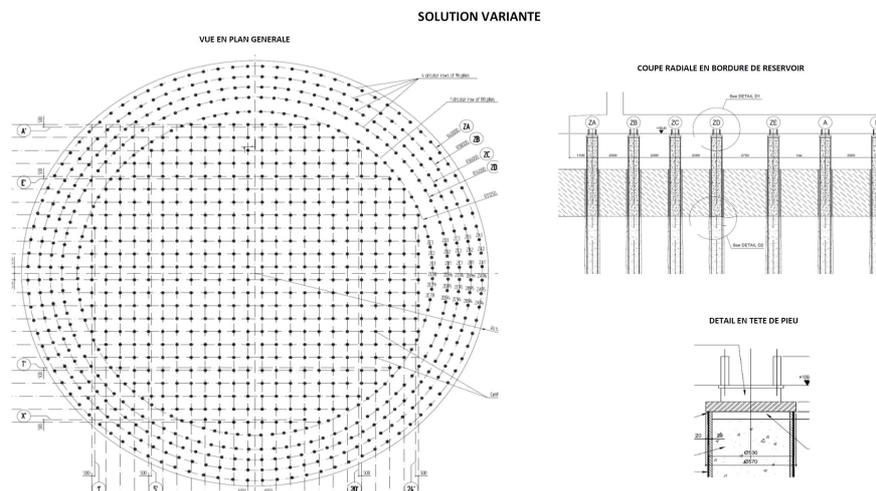


Figure 5 : principe des fondations de la variante du groupement d'Entreprises

3 LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

3.1 CONTEXTE

Comme pour tous les ouvrages réalisés en Russie, les études doivent être conformes à la réglementation locale, constituée des Standards SNIP et GOST. Par ailleurs, le client (groupement dont fait partie TOTAL à hauteur de 25%) a demandé à ce que les études soient également conformes aux Eurocodes.

En pratique, les bureaux d'études de VINCI Construction Grands Projets et Entrepose Projets ont conduit leurs études respectives selon les Eurocodes et se sont adjoints les services d'instituts russes pour vérifier leur conformité avec la réglementation russe, en faisant les ajustements requis si nécessaire.

3.2 ÉTUDES DES FONDATIONS

L'extrême hétérogénéité du permafrost dans sa partie supérieure, environ 55 m, combinée aux critères de déformations spécifiques aux réservoirs GNL (par exemple la tangente de la déformée du radier selon toute coupe radiale ne doit pas dépasser 1/300) a conduit à réaliser une étude poussée d'interaction sol-structure sous la forme d'un modèle 3D complet (à l'aide du logiciel MIDAS) incluant :

- Le réservoir en béton modélisé par des éléments de type coque pour le radier, le voile et le dôme et en éléments de type barres pour les 948 pieux



- Le permafrost modélisé par des éléments de type solide. Pas moins de 44 types de sol, caractérisés par leur module de déformation et leur coefficient de Poisson, déduits des nombreux essais réalisés, ont été utilisés.
- Les dimensions de l'ensemble du modèle (pour la partie sol) ont été fixées à 160 m verticalement (correspondant à deux fois le diamètre du réservoir) et à 400 m horizontalement (de manière à obtenir des tassements nuls avant les frontières du modèle). À noter que l'hétérogénéité du sol a conduit à réaliser une modélisation pour chacun des 4 réservoirs. La figure 6 montre une vue d'ensemble du modèle réalisé pour le réservoir n°3.

Les calculs ont été conduits pour les quatre situations suivantes :

- En fin de construction
- En phase d'hydro test (le bac métallique est rempli d'eau avec un poids total représentant 125% du poids total de GNL)
- Après consolidation des sols
- En service (le réservoir est plein de GNL)

La figure 7 donne un exemple des résultats obtenus.

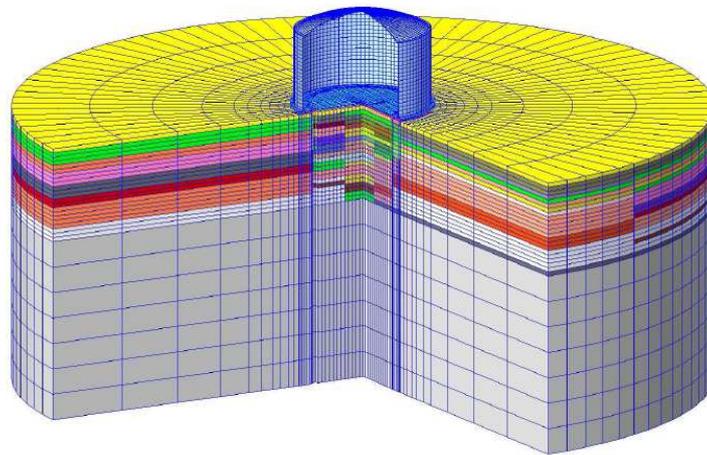


Figure 6 : vue d'ensemble du modèle MIDAS pour le réservoir N°3

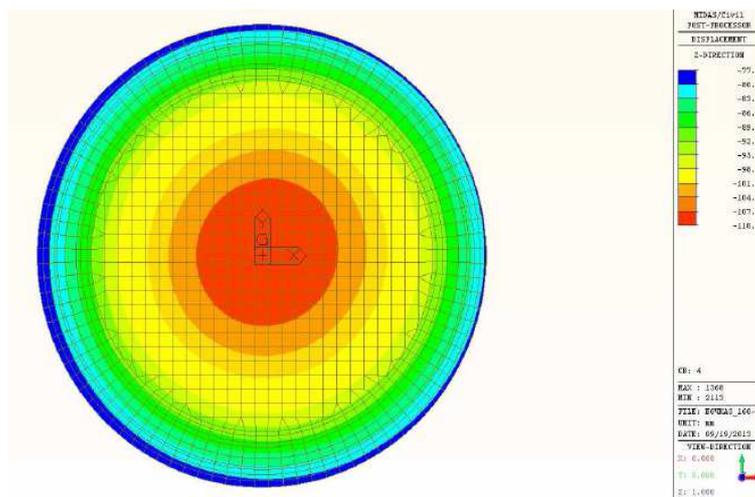


Figure 7 : carte d'iso-déformée verticale en service du radier du réservoir n°3

3.3 ÉTUDES DE L'ENCEINTE EN BETON

Les études du réservoir béton proprement dit comportent trois étapes principales :

- Études sismiques
- Études en situations normales
- Études en situations exceptionnelles

3.3.1 Études sismiques

Le niveau sismique dans la zone des réservoirs est très faible puisque l'accélération du sol (PGA) est de seulement $0,185 \text{ m/s}^2$ pour le séisme de période de retour 2500 ans. L'étude sismique a consisté en une analyse modale spectrale réalisée avec le logiciel HERCULE sur un modèle de type « brochette ». Compte tenu du faible niveau sismique, l'interaction sol-structure a été négligée, le réservoir étant considéré encastré à sa base. Les combinaisons d'actions incluant le séisme n'ont été critiques pour aucun des éléments constitutifs des réservoirs.

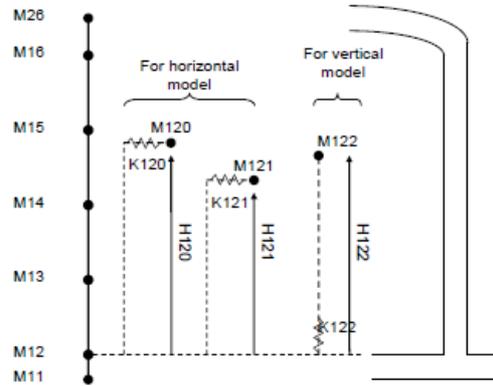


Figure 8 : principe de la modélisation pour calcul sismique

3.3.2 Études en situations normales

Les situations dites « normales » incluent :

- Les phases de construction
- Les phases de test (hydro test et pneumatique test)
- Les phases de service (réservoir vide ou plein)

Ces différentes situations ont été étudiées à l'aide d'un modèle 3D en élasticité linéaire à l'aide du logiciel HERCULE.

Tous les cas de charges admettant un plan de symétrie, seule la moitié du réservoir a été modélisée.

Des éléments de type coque ont été utilisés pour le radier, voile et dôme, tandis que les pieux ont été modélisés par des éléments de type poutre.

L'interaction sol-structure a été prise en compte au moyen d'appuis élastiques ajustés de manière à retrouver, pour chaque situation, les tassements obtenus par le modèle MIDAS décrit au paragraphe 3.2.

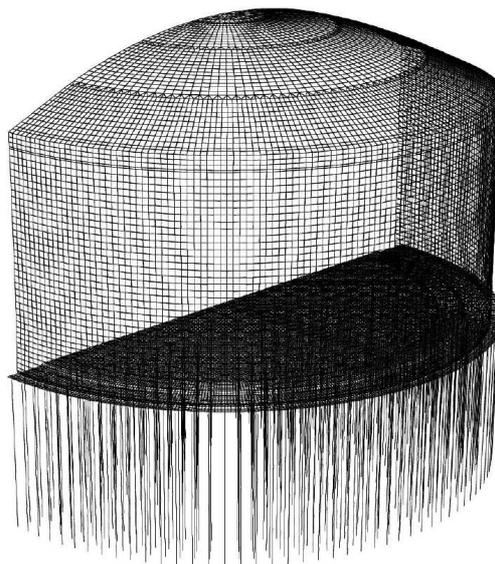


Figure 9 : vue d'ensemble du modèle 3D HERCULE

L'utilisation intensive des cartes de ferrailages, déterminées automatiquement par le logiciel, a constitué une aide précieuse à la mise au point du ferrailage de l'ensemble de la structure.

3.3.3 Études en situations exceptionnelles

Les réservoirs GNL sont systématiquement l'objet d'études spécifiques pour les deux situations exceptionnelles suivantes :

- **Rupture du bac métallique** : en fonctionnement normal, le GNL est contenu par le réservoir métallique et les charges correspondantes sont directement transmises au radier du réservoir béton, puis aux fondations. La rupture accidentelle du réservoir métallique, que la réglementation impose de prendre en compte, a donc pour conséquence que l'ensemble du GNL est contenu exclusivement par le réservoir extérieur en béton, la poussée hydrostatique du GNL agissant directement sur le voile béton. C'est la raison pour laquelle ce voile est précontraint par un ensemble de câbles horizontaux et verticaux. De plus, la partie interne du voile béton, en contact direct avec le GNL, est soumise à une température de -163°C ,
- **Feu à l'extérieur du réservoir** : cette situation accidentelle consiste à considérer que le voile et le dôme des réservoirs sont soumis à une radiation thermique de 32 kW/m^2 . La durée de cet incendie est déterminée par une étude de risques à la charge du client, elle a été fixée à deux heures pour le terminal de Yamal.

Chacune des deux situations accidentelles précédemment décrites fait l'objet d'études spécifiques réalisées en deux étapes successives :

- **La première étape consiste en une étude thermique** visant à déterminer les champs de température dans l'épaisseur des éléments en béton. Cette étude est réalisée à l'aide du logiciel ANSYS (module thermique), le modèle utilisé incluant non seulement les éléments en béton mais également l'ensemble des matériaux isolants disposés entre le réservoir métallique interne et le réservoir béton externe comme explicité sur la figure 10.

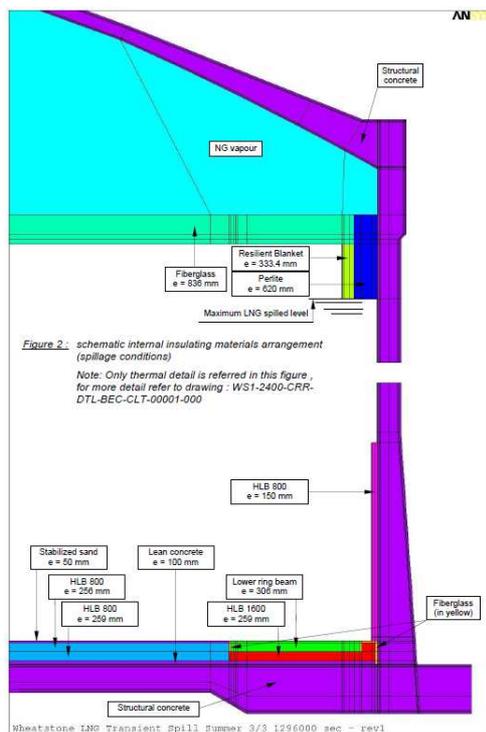


Figure 10 : modèle ANSYS - coupe type béton et matériaux isolants pour étude thermique

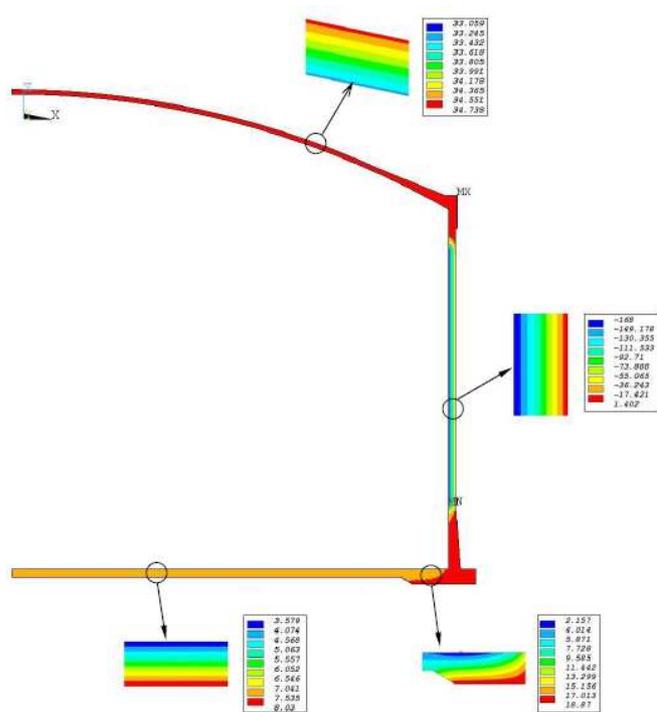


Figure 11 : modèle ANSYS – champs de températures en situation rupture du bac métallique

Les résultats de cette étude sont les champs de températures pour les différentes situations (rupture du bac métallique ou incendie) comme illustrée figure 11.

- **La seconde étape consiste à réaliser une étude thermo mécanique non linéaire**: les champs de températures issus de l'étude thermique sont utilisés comme cas de charges pour l'étude structurelle. Du fait des valeurs élevées des gradients de température obtenus, une étude en mode linéaire ne peut pas être retenue car les sollicitations résultant de ces gradients seraient inacceptables pour la structure. Les sollicitations induites par les gradients thermiques étant proportionnelles à la raideur des éléments considérés, la prise en compte des inerties fissurées des sections en béton armé ou précontraint permet de réduire ces sollicitations. Un tel comportement ne peut être appréhendé que par une modélisation intégrant le comportement non-linéaire des

matériaux. Le Département conception et études de structures de VINCI Construction Grands Projets a élaboré un logiciel aux éléments finis, ICW, permettant de mener à bien cette étude spécifique : le réservoir est modélisé par des éléments finis multicouches, au comportement axisymétrique, intégrant les différents composants d'une section de béton, avec prise en compte de leurs lois de comportement contraintes-déformations non-linéaires (ces dernières pouvant être définies en fonction de la réglementation utilisée) :

- Le béton
- Les quatre nappes d'armatures passives
- Les câbles de précontrainte horizontaux et verticaux

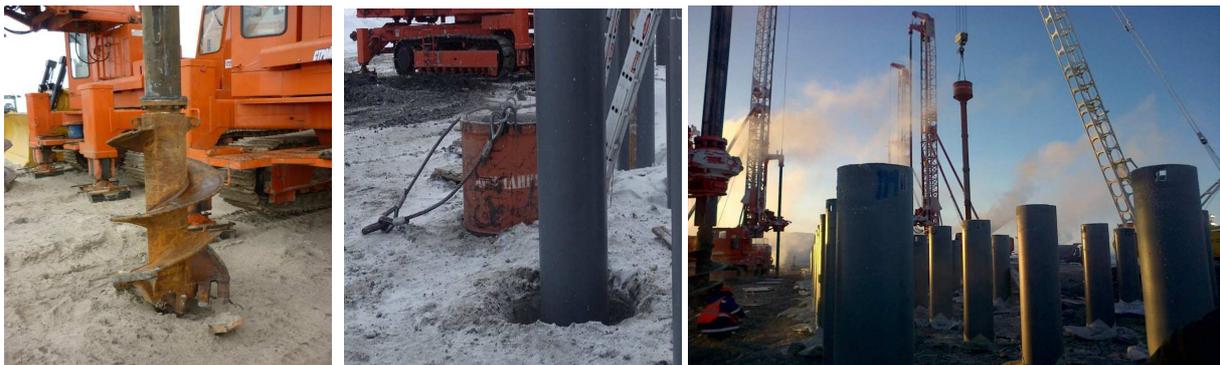
Les lois de comportements utilisées permettent également de prendre en compte l'évolution de certaines caractéristiques mécaniques (comme par exemple les résistances du béton et de l'acier) en fonction de la température.

Lorsque la convergence des calculs est obtenue, le logiciel ICW fournit les états de contraintes et déformations en tous points du réservoir et pour les différents matériaux, permettant ainsi une vérification méthodique de tous les critères spécifiques aux situations de feu ou de rupture du bac métallique (critères de contraintes, de déformations plastiques, d'ouvertures de fissures).

4 RÉALISATION

4.1 FONDATIONS PAR PIEUX DANS LE PERMAFROST

Il s'agit, pour chaque réservoir, de 950 pieux d'une longueur de 24 m :



Figures 12 : le processus de forage des pieux

Pour chacun des pieux, un avant-trou est foré dans la permafrost, à la tarière d'un diamètre de 70 cm et sur une profondeur de 22 m. Après la pose d'une chemise en tête de forage, le trou est rempli de nouveau avec un mélange eau-sable-ciment, un pieu en acier de 53 cm de diamètre et de 24 m de longueur y est ensuite vibro-foncé.

Ce mélange eau-sable-ciment gèle et durcit, et agit donc comme un liant avec le sol (permafrost), dont la température, qui varie de -9°C à -7°C , ne permet pas à un mortier de ciment normal de prendre avant qu'il ne gèle.

Par ailleurs, le réservoir est posé à 2 m au-dessus du sol, le sol étant lui-même formé par un remblai de 2 m au-dessus du permafrost. Ce dispositif permet à la fois de ne pas perturber l'équilibre thermique du permafrost et d'assurer une certaine liberté de mouvement entre pieux et remblais.

Entre chaque pieu, un thermo-stabilisateur est également posé. Il contient un liquide à changement de phases, sensible à la température et passant d'un état gazeux à liquide (actif entre -50°C à -15°C). Le principe consiste à installer dans le sol un thermos-siphon constitué d'un long tuyau, d'une longueur de 21 m et d'un diamètre 38 mm en acier cryogénique, sur le sommet duquel il y a un radiateur simple. Le radiateur est situé dans l'espace libre en dessous du réservoir, dans la veine d'air « froid » (arctique !).

Le thermos-siphon est hermétiquement scellé et rempli de gaz à changement de phases à l'usine. En Russie, le gaz couramment utilisé est le R22 halocarbon. Il a une température de liquéfaction autour de -15°C . Par conséquent, en hiver (d'une durée de neuf mois environ et avec des températures pouvant atteindre jusqu'à -50°C), l'air froid, soufflant en dessous du réservoir, refroidit le radiateur, le gaz se condense et se liquéfie. Par gravité le liquide R22 tombe au fond du tube cryogénique. Il y a ainsi échange de chaleur entre le sol (température initiale nominale du permafrost environ -6°C à -7°C) et le liquide froid R22. La température du sol est diminuée tandis que le liquide R22 est chauffé puis vaporisé. Le gaz remonte alors vers le radiateur où il est refroidi et le cycle peut recommencer.

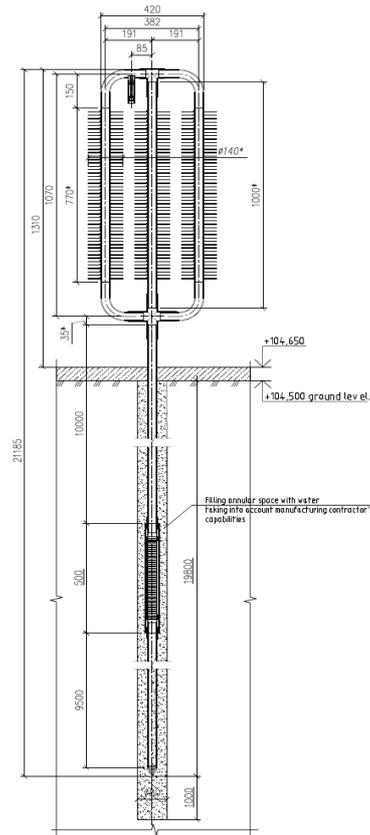


Figure 13 : le thermosiphon - schéma

Ce système ne nécessite aucune énergie externe car elle est basée sur la caractéristique physique du gaz. Le tuyau et le radiateur étant scellés, le gaz-liquide reste dans le thermosiphon et le système est perpétuel.

Toutefois, le système ne fonctionne qu'en hiver, car durant la période « estivale », la température de l'air extérieur est supérieure à la température de liquéfaction du gaz. Le gaz reste donc dans le radiateur.

Il cesse, également, de fonctionner lorsque la température de l'ensemble du sol situé sous le réservoir atteint la température de liquéfaction du gaz, il n'y a, en effet, plus d'échange de chaleur possible. Les calculs montrent que le système devrait prendre l'intervalle de dix ans pour avoir la pleine terre (permafrost) autour de toute la longueur des piles congelées de -15 à -17 ° C environ.

4.2 RADIER SURELEVE



Figures 14 : les thermo-stabilisateurs placés entre chaque pieu, la dalle et le radier surélevé

Une fois les thermo-stabilisateurs et pieux installés ainsi que le dallage coulé, les appuis « rotules » fixés sont placés sur la tête des pieux et le coffrage horizontal est installé pour permettre la réalisation du radier surélevé.

Suite à des essais, le dallage a été renforcé et l'installation du coffrage horizontal du radier a été rehaussée de 8 mm par rapport au design. Leur réalisateur en conformité avec les plans d'exécution a été un succès.

Pendant le coulage du radier d'une épaisseur de 1 m, il a fallu résoudre le problème des tassements différentiels, entre le niveau du coffrage du radier soutenu par le remblai-permafrost (variant avec le dégel) en-dessous, et le niveau des appuis fixés (stables) au-dessus des pieux.

4.3 MUR EXTERIEUR EN OUTIL GLISSANT

Principes de base

- Arguments pour l'utilisation du coffrage glissant pour la réalisation des murs des quatre réservoirs d'une hauteur 40 m :

Les conditions météorologiques spécifiques, à 700 km au nord de cercle arctique, offrent une « fenêtre météo » de quatre mois par an, compatible avec les conditions de bétonnage externes acceptables. Seul un outil de coffrage glissant permet, de couler une paroi haute de 40 m en moins de 24 jours.

- Dès lors, le choix de l'outil glissant entraîne des dispositions obligatoires à prendre :
 - o Construction d'une maquette et formation

Après livraison, cinq semaines sont nécessaires pour le pré-assemblage l'outil, à proximité du site de construction du réservoir.

Parallèlement, un mois avant le démarrage du coulage du voile, une « maquette » d'une longueur de 12 et d'une hauteur de 10 m est construite sur la zone, pour la formation des métiers directement concernés (équipes de coffrage, de ferrailage et de coulage du béton), ainsi que des autres postes (travailleurs et encadrement). L'idée est de former tout le personnel en équipe intégrée.

La formation « outil glissant » est animée par le chef de l'équipe coffrage glissant. Toute personne directement impliquée y participe avant le démarrage des opérations de coffrage glissant.

- o Planification

L'opération de l'outil glissant est un processus continu 24/7, la planification doit donc anticiper l'approvisionnement du béton, du ferrailage, des conduits et inserts, des pièces de rechange et produits consommables afin de ne pas entraver la production.

À cet effet, une liste des inserts est produite avant le démarrage des opérations de coffrage. Elle contient l'ensemble des informations relatif aux inserts à poser (position exacte, niveau d'ancrage, etc.). Une liste distincte est également pour l'installation des bandes d'inserts pour le Liner acier.

La planification demande, par ailleurs, de prévoir les équipes de travail en adéquation avec les tâches à accomplir.

Opérations de l'outil glissant

- Start-up :
 - o Installation-réglage de l'outil glissant sur le radier
 - o Fixation du renforcement, inserts des conduits de post-tension
 - o Mise en place et compactage du béton en place

Après avoir terminé une coulée (5 à 6 couches), d'une hauteur d'1 m environ, et dès que le béton a atteint sa résistance adéquate, le hissage du coffrage peut commencer...



Figure 15 : le hissage du coffrage



– L'exécution partie courante du voile avec l'outil glissant

Lorsque la phase de démarrage est terminée, l'opération de coffrage glissant se poursuit à une certaine vitesse et de levage. Un taux de coffrage glissant de 2 à 2,5 m par 24 heures est normal. La vitesse de levage est ajustée aux conditions de résistance du béton, de réglage de l'outil et de la complexité de la zone.

Pour déterminer le niveau de prise du béton, une barre de Ø 12 mm est y plongée vers le bas dans jusqu'à ce qu'elle rencontre la face avant du durcissement. Sur la base de ces informations, le levage du coffrage est décidé.

La verticalité de l'outil glissant est vérifiée au moins tous les 2 heures et tous les 0,75 m. Pour cet outil, 16 lasers sont installés. Les lasers sont installés sur le radier, le faisceau pointé sur un point fixe (où il peut être contrôlé) et verticalement à travers une ouverture dans la plate-forme. La déviation de la verticalité est corrigée avec les vérins de hissage ou en plaçant des poids en conséquence sur la plate-forme.

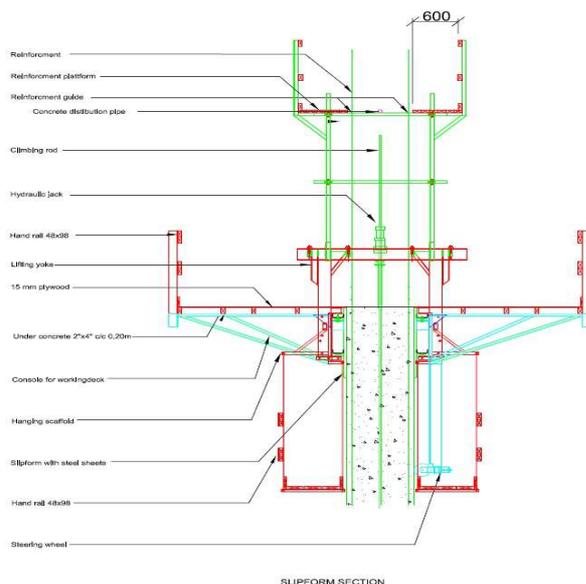
L'horizontalité de la plateforme est aussi continuellement contrôlée par un laser horizontal vérifiant le niveau de chaque vérin de hissage.



Figure 16 : l'opération du coffrage glissant

La vitesse du coffrage glissant est réduite au cours des opérations consommatrices de temps telles que l'installation des encastres horizontaux, niveaux + 2,5 m et + 5 m au-dessus de la dalle supérieure de base ou à l'approche du haut du mur et arrêt fonctionnement du coffrage glissant.

Un produit de cure est appliqué à toutes les surfaces en béton. Ce composé doit être appliqué sur les parois du voile, au niveau de la passerelle de ragréage, au moins une fois par quart de travail. Les zones présentant des déficiences de surface sont marquées pour la réparation avant de placer le produit de cure.



Figures 17 : coupe du coffrage et plateforme de coffrage

Une isolation thermique en toile haute de 4 m est accrochée sous les passerelles suspendues, elle recouvre chaque face de la paroi, y compris la hauteur des passerelles suspendues, et une protection thermique pour le béton jeune, pendant 2 à 3 jours, afin qu'il « mûrisse » correctement.

À noter : un arrêt de 24 h du coffrage glissant suivi d'un redémarrage de l'opération, sans joint de construction, est possible s'il est soigneusement planifié.

Dans cette situation, le coffrage est levé à une vitesse d'environ 2,5 cm/h. Un arrêt jusqu'à quatre heures n'a pas besoin de précautions particulières.

Toutefois, tout joint de construction après un arrêt nécessaire, doit être traité avec un retardateur de surface et lavé à l'eau à haute pression

Le nettoyage des panneaux de coffrage lors de coffrage glissant est l'une des tâches les plus importantes puisqu'il conditionne la qualité sur le mur. À Yamal, la stratégie est de changer systématiquement un panneau dès détection d'un problème ou soupçon. Une équipe dédiée formée et dirigée par le spécialiste est en charge de la modification de ces panneaux.

- Démontage de l'outil glissant et support temporaire

Le processus de coffrage glissant de mur est arrêté entre 1,30 m et 1,80 m sous le niveau de la jupe de compression du toit en acier. Des potelets en acier sont intégrés dans la partie supérieure du mur et servent alors de support temporaire à la partie acier de toiture.



Figure 18 : coulage de la partie haute du voile

L'outil est, ensuite démantelé-modifié via les plates-formes de travail. Les secteurs de toit préfabriqués de la membrane intérieure en acier sont assemblés en place, grâce à l'appui temporaire constitué d'un mât au centre sur et grâce aux potelets en périphérie.

La partie intérieure de réservoir est, dès lors, prête pour l'aménagement puisque protégée contre les intempéries.



Figure 19 : vue du revêtement métallique intérieur avant coulage béton

4.4 TOITURE DOME EN BETON

Coulage du haut du voile et début toiture

La partie supérieure de la paroi, au-dessus du revêtement intérieur acier du toit, et en comprenant les ancrages de précontrainte verticale, est l'interface structurelle du toit. Le coffrage de la face externe se fait par la plate-forme de paroi extérieure et la face interne à du joint de reprise situé en pente au-dessus du revêtement en acier du toit. Ce coulage se fait en phase verticale.



Figures 20 : coulage du haut du voile et début toiture

Coulage de l'anneau périphérique du toit

Cette bande de 5 m de transition du toit, avec une variation d'épaisseur de toit de 1,4 m côté mur, 0,4 m côté toit, est coulée par quartier, en phase horizontale.



Figure 21 : coulage de l'anneau périphérique du toit

Coulage de la partie en dôme du toit

Le toit en béton est coulé par phase et la mise en place est exécutée en 2 couches séparées.

Le revêtement de toit en acier étant toujours soutenu par le mât central temporaire et les potelets en périphérie, le dôme standard, d'une épaisseur de 0,4 m est coulé par étape pour contrôler le retrait, et en deux couches pour ne pas surcharger le mât central de support temporaire.



Figures 22 : coulage de la partie en dôme du toit