

# LA TOUR SOLAIRE D'ASHALIM EN ISRAËL

AUTEURS : AUDREY ZONCO, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI - JEAN-BERNARD DATRY, DIRECTEUR, SETEC TPI - FRANÇOIS PRONGUÉ, PROJECT MANAGER, HEBETEC - THOMAS DUM, PROJECT MANAGER, GLEITBAU - GILLES OUDIN, DIRECTEUR, FERBECK INDUSTRIAL CHIMNEYS

EN PLEIN DÉSERT DU NÉGUEV, UNE INSTALLATION GIGANTESQUE PRODUIT DE L'ÉNERGIE DEPUIS LE PREMIER TRIMESTRE 2018. CETTE TECHNIQUE INÉDITE PERMETTRA À ISRAËL DE SE POSITIONNER DANS LES ÉNERGIES RENOUVELABLES. LA TOUR D'ASHALIM EST AUX PRÉMICES D'UNE RÉVOLUTION VERTE OÙ SONT PRÉSENTES LES ÉTUDES ET LES TECHNIQUES DE GÉNIE CIVIL LES PLUS COMPLEXES.



## ISRAËL S'ENGAGE VERS LE SOLAIRE

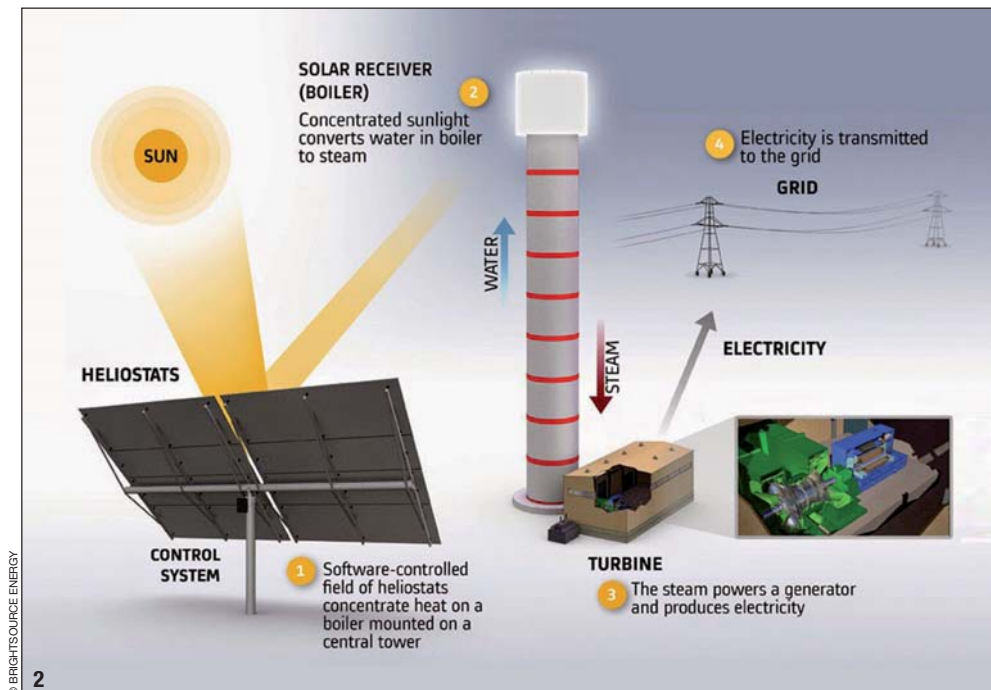
Israël s'est récemment fixé comme objectif de générer 10% de son énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2020, pour atteindre 17% d'ici 2030, et ce à partir du taux actuel de 2,5%. Ainsi, le gouvernement israélien a lancé en 2013 un appel d'offres pour un projet solaire dans le désert du Néguev en

Israël, près du kibboutz d'Ashalim, dans une zone située à environ 35 km au sud-sud-ouest de Beersheba. Il s'engage à acheter de l'électricité sur ce site pendant plus de 25 ans. L'enjeu est de taille car Israël pourrait en théorie répondre à tous ses besoins en électricité en utilisant seulement 4% du désert du Néguev. La centrale solaire d'Ashalim est composée de trois par-

**1- Vue de l'ensemble du projet Ashalim en septembre 2017.**

**1- Overall view of the Ashalim project in september 2017.**

celles, chacune dotée d'une technologie solaire différente, qui devraient au total générer environ 310 mégawatts (soit environ 1,6% des besoins énergétiques du pays). C'est le plus grand projet d'énergie renouvelable en Israël, et le 5<sup>e</sup> plus grand dans le monde. Dans le futur, une quatrième parcelle est prévue avec une seconde centrale à concentration solaire (CSP).



Megalim Solar Power Limited a remporté l'appel d'offres pour la construction, la planification, le financement et l'exploitation de l'usine CSP située sur la parcelle B. C'est une société dédiée au projet, formée par le fonds d'investissement israélien NOY Infrastructure & Energy Investment Fund (49,9%), associé à GE Renewable Energy (25,05%) pour l'ingénierie et la construction et BrightSource (25,05%) pour la technologie thermodynamique. Le coût total du projet est d'environ 660 millions d'euros, dont environ 25 millions d'euros pour le génie civil de la tour.

**2- Fonctionnement d'une tour solaire.**  
**3- Cinématique de la chaudière.**

**2- Operation of a solar tower.**  
**3- Boiler kinematics.**

### SPÉCIFICITÉS DE LA TOUR ASHALIM

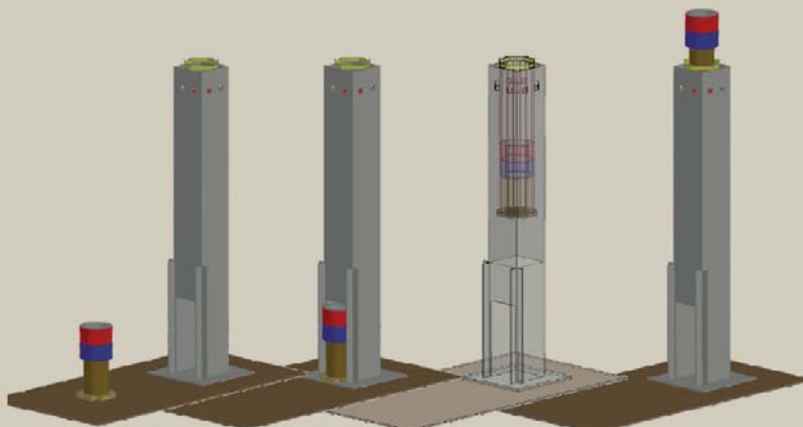
Une tour solaire est un type de centrale solaire thermodynamique utilisant une tour pour recevoir les rayons solaires concentrés à partir d'un champ d'héliostats contrôlés par ordinateur. Il en existe environ une dizaine dans le monde, notamment au Maroc, en Afrique du Sud et en Californie, où les tours de 137 m de haut à Ivanpah dans le désert de Mojave étaient encore les plus hautes du monde avant la construction d'Ashalim. La tour Ashalim est la tour solaire

la plus haute du monde, atteignant 240 m, plus haute que la Tour Montparnasse de Paris ou le Gherkin de Londres. Si la tour est aussi haute, c'est que les panneaux ont été resserrés les uns contre les autres pour optimiser l'utilisation des terres - et plus les panneaux sont proches, plus la tour doit être grande. À la base de la tour, 55 000 héliostats répartis sur une zone de 300 ha - l'équivalent de plus de 400 terrains de football - suivent la course du soleil, comme des tournesols et réfléchissent la lumière du soleil au sommet de la tour sur une chaudière spécifique appelée boiler, un générateur de vapeur à récepteur solaire qui ressemble à une ampoule géante. Ainsi, la tour, telle un phare, est visible à des dizaines de kilomètres à la ronde dans ce désert rocailleux. Quand les rayons solaires concentrés frappent la chaudière sur sa surface active, sa température monte à 600 °C, et elle transforme l'eau en vapeur, qui est ensuite canalisée vers le pied de la tour et utilisée pour faire tourner une turbine à vapeur et créer de l'énergie mécanique (figure 2).

Le projet Ashalim s'appuie sur l'expérience acquise par Brightsource dans le cadre de la plus grande centrale à concentration au monde, Ivanpah Solar, mais apporte des innovations sur le design des héliostats dont la taille est multipliée par trois par rapport aux générations précédentes, et sur les connexions wifi. En ce qui concerne la technologie du récepteur, si le projet Ashalim utilise de la vapeur d'eau et n'a pas la capacité de stocker l'énergie, il faut noter que des nouvelles CSP utilisant du sodium liquide ou des sels fondus (40% de nitrate de potassium, 60% de nitrate de sodium) comme fluides de travail sont aujourd'hui en fonctionnement. Ces fluides ont une capacité thermique élevée, qui peut être utilisée pour stocker l'énergie avant de l'utiliser pour faire bouillir de l'eau et entraîner les turbines. Ces conceptions permettent donc de générer de l'énergie lorsque le soleil ne brille pas.

En ce qui concerne la structure de la tour, habituellement, les tours solaires sont faites d'une structure métallique en treillis. Les tuyaux qui transportent l'eau vers le haut et la vapeur vers le bas de la tour sont situés à l'intérieur du fût en treillis. Dans le cas d'Ashalim, le concept de construction consiste à utiliser une tour en béton comme une cage d'ascenseur pour la chaudière, conçue pour être soulevée d'un seul tenant par le bas.

### CINÉMATIQUE DE LA CHAUDIÈRE





La chaudière et son plancher métallique sont assemblés sur le site, ensuite testés, dans un emplacement proche de la tour, puis déplacés à l'intérieur de la tour, enfin soulevés et ancrés dans leur position fonctionnelle au sommet de la tour (figure 3).

De cette façon, l'intérieur de la tour doit rester dégagé jusqu'au levage : tuyaux d'eau et de vapeur se trouvent à l'extérieur de la tour, dans une structure en acier appelée VPR (*vertical pipe rack*), préfabriquée sur place et soulevée grâce à une grue à tour Sarens dans sa position finale.

En pratique, la chaudière, le VPR et la tour sont construits en parallèle, afin de réduire le calendrier global du projet.

### CONCEPTION DE LA STRUCTURE DE LA TOUR EN BÉTON

#### GÉOMÉTRIE GÉNÉRALE

La tour en béton armé est haute de 209,515 m. Sa principale exigence fonctionnelle est d'élever et de porter la chaudière à son sommet.

Afin de laisser glisser la chaudière de 21,20 m de diamètre et 50 m de haut dans la tour, une ouverture de 23,7 m de largeur et de 52,515 m de hauteur doit y être réalisée.

En phase esquisse, Ferbeck Industrial Chimneys a comparé plusieurs géométries de tour pour accueillir cette ouverture (figure 4) :

- Une section carrée sur toute la hauteur, avec un portique autour de l'ouverture afin de restituer la rigidité d'un voile plein sous les forces latérales ;
- Une section circulaire sur toute la hauteur, afin de minimiser les efforts de vent (surface exposée et coefficient de force) ;

→ Une géométrie mixte, avec une section carrée sur les 57 premiers mètres avec un portique autour de l'ouverture, et une section circulaire sur les 120,515 m les plus hauts, les deux parties étant reliées par une pièce de transition de 31,515 m. Cette géométrie a été choisie comme le meilleur compromis pour réduire les charges de vent et les déformations latérales.

#### 4- Les trois géométries étudiées.

#### 5- Construction géométrique de la zone de transition.

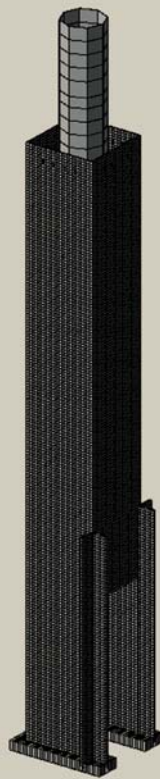
#### 4- The three shapes studied.

#### 5- Geometric construction of the transition zone.

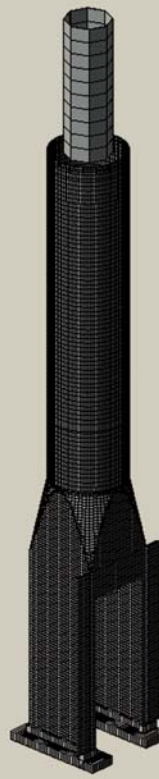
À 206,515 m du niveau du sol, un plancher métallique en acier porte la chaudière. Au sommet de la tour (209,515 m), une poutre de couronnement rigidifie la section circulaire. Une isolation est située de +186 au sommet de la tour +209,515, afin de limiter l'effet thermique du rayonnement solaire.

L'ensemble de la structure est enveloppé par une résille architecturale, initialement prévue en câbles précon-

### LES TROIS GÉOMÉTRIES ÉTUDIÉES



4a



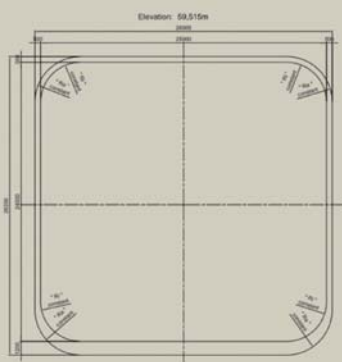
4b



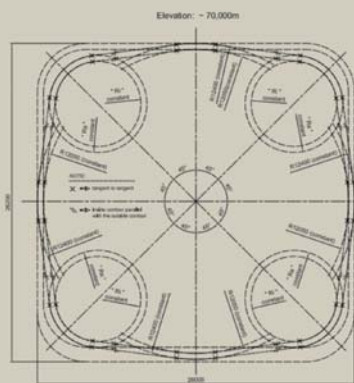
4c

© FERBECK

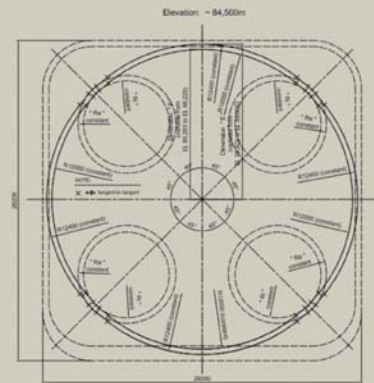
### CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE LA ZONE DE TRANSITION



5a



5b



5c

© GLEITBAU

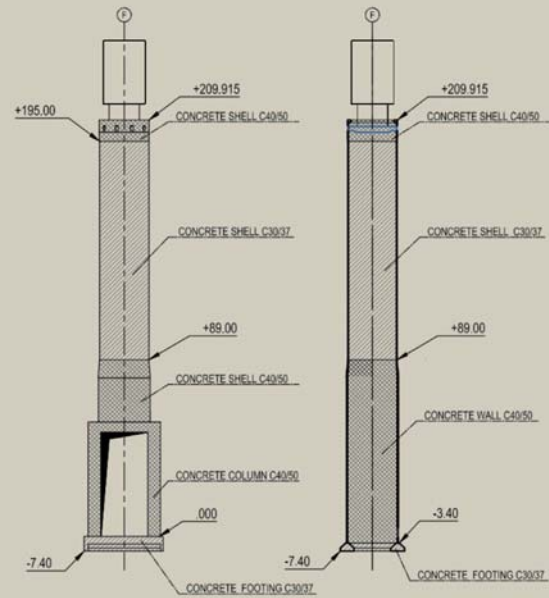
## ZONES DE TRACTION VERTICALE



© SETEC TPI

6

## QUALITÉS DE BÉTON



7

trains, mais dont la constitution finale est encore à l'étude.

La conception en phase projet et exécution est réalisée par Setec tpi, selon les Eurocodes, pour une durée de vie de 25 ans.

Le cahier des charges donnait certaines valeurs, limites ou conditions spécifiques israéliennes, de sorte que la conception soit acceptée par le contrôleur israélien Galil. Le modèle global par éléments finis de la tour a été réalisé dans @Pythagore, un logiciel développé par Setec tpi, réputé pour permettre le calcul des structures en

**6- Zones de traction verticale.**

**7- Qualités de béton.**

**8- Élévation du linteau.**

**6- Zones of vertical tension.**

**7- Properties of concrete.**

**8- Elevation view of lintel.**

béton en tenant compte du calendrier et du phasage de construction, et dont les références sont nombreuses.

## GÉOMÉTRIE DE LA ZONE DE TRANSITION

Le coffrage glissant est le choix logique pour construire cette tour solaire, en raison non seulement du planning de construction, mais aussi de la géométrie extrêmement complexe de cette tour.

En effet, le coffrage glissant est reconnu comme une méthode rapide, sûre et rentable pour la construction de tout

type de structures en béton, mais dans le cas spécifique d'Ashalim, Gleitbau Salzburg a mis au point un système de coffrage conique permettant des changements de géométrie compliqués sans interruption du processus de travail.

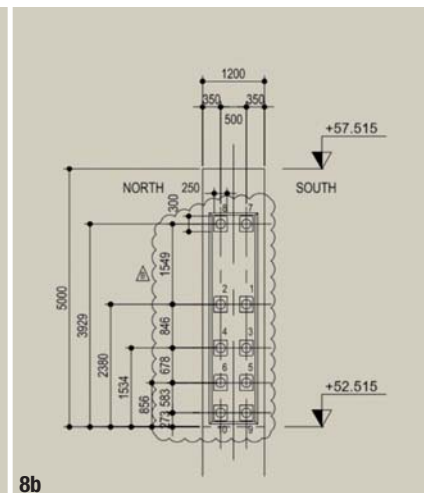
La géométrie précise de la zone de transition, qui passe d'un carré à un cercle, mais qui voit aussi des changements d'épaisseur des voiles (50 cm en pied, 35 cm en tête, 120 cm autour de l'ouverture), a été développée en étroite collaboration entre Setec tpi, concepteur de la tour, et Gleitbau, spécialiste du coffrage glissant (figure 5). ▷

## ÉLÉVATION DU LINTEAU



© SETEC TPI

8a



8b

**9- Ferrailage de la fondation.**  
**10- Coupes sur la fondation.**

**9- Foundation reinforcing bars.**  
**10- Cross sections of foundation.**

Elle résulte de contraintes pratiques de constructibilité d'une part - elle est constituée d'arcs de cercles de seulement deux rayons distincts (4 m et 12,4 m) et des lignes droites, afin de faciliter le façonnage et la mise en place des armatures - et de contraintes géométriques liées à l'outil coffrant d'autre part, telles qu'une inclinaison maximale, un rayon minimum dans le sens horizontal et vertical. À +89 m, la section transversale de 26 m de côté est devenue un cylindre de 24,8 m de diamètre.



9 © DR

**CONCEPTION STRUCTURELLE DU FÛT**

Dans la partie inférieure de la tour jusqu'à +52,515, la section transversale est un carré mesurant 26 m x 26 m, avec des congés de 4 m de rayon. Dans cette zone, le voile voit le cisaillement global maximal et la contrainte verticale maximale sous charges latérales, ainsi que la flexion locale due au vent.

La contrainte verticale moyenne en compression sous combinaisons de service est d'environ 10 MPa.

Le poids de la tour compense la traction due au moment de renversement du vent, sauf en bas dans les angles du fait du traînage de cisaillement et dans la zone de transition où subsiste de la traction (figure 6).

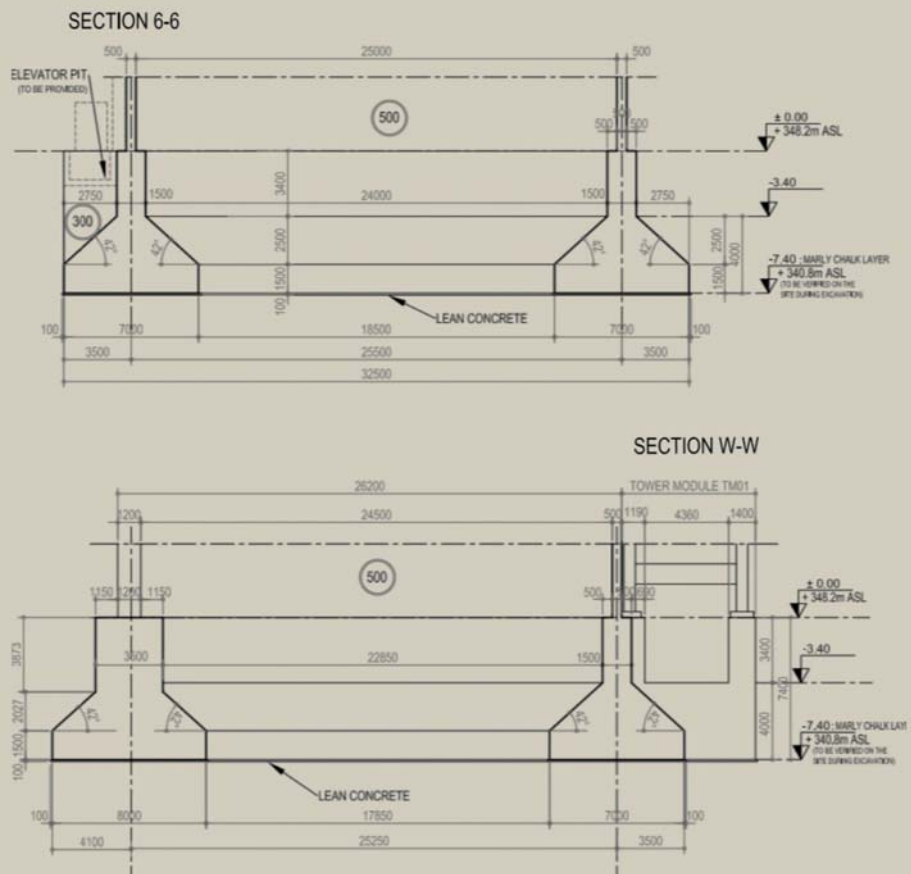
Les moments de flexion transversaux et longitudinaux locaux dus au vent, dans la partie ouverte, sont proches des moments de flexion d'une plaque infinie sur trois côtés.

L'épaisseur requise est de 50 cm, et la qualité du béton C40/50.

Dans la partie cylindrique, il n'y a pas de traction verticale sous combinaisons de service. L'épaisseur requise est de 35 cm et la qualité du béton C30/37 (figure 7).

Au sommet de la tour, une poutre de couronnement de 1,65 m de large et 1,3 m de haut permet de rigidifier la section cylindrique mais sert aussi d'appui des vérins de levage de la chaudière.

**COUPES SUR LA FONDATION**



10 © SETEC TP











© DR 15

concepteur de la tour. Afin d'éviter tout transfert de poids, les deux structures sont verticalement indépendantes, grâce à des liaisons par des bielles bi-articulées. Ceci permet également à la tour de pouvoir se courber sous un gradient longitudinal thermique sans créer d'effort vertical dans le VPR. Seules les charges horizontales sont transférées du VPR à la tour en béton, grâce aux bielles pour les vents Nord-Sud et grâce une clé de cisaillement centrale pour les vents Est-Ouest. La disposition des bielles et clés de cisaillement est conçue de manière à éliminer tout effet hyperstatique dans le VPR, et à éviter l'influence de l'ova-

**15- Coffrage sur la partie cylindrique.**

**16- Coffrage sur la hauteur de l'ouverture.**

**17- Poutre treillis supportant le coffrage du linteau.**

**15- Formwork on the cylindrical part.**

**16- Formwork over the aperture height.**

**17- Lattice beam supporting the lintel formwork.**

lisation de la tour, qui augmenterait les efforts dans le VPR. Pour gérer les tolérances de construction, les bielles sont constituées de tiges filetées coupées à longueur après relevé géométrique de la tour béton et la clé de cisaillement dispose d'un interstice qui peut être rempli par des plaques métalliques de calage (figure 14).

### LES SPÉCIFICITÉS DU COFFRAGE GLISSANT

La vitesse du glissement est conditionnée par la logistique (rythme de d'approvisionnement des matériaux sur la plateforme de travail) et l'exécution des travaux (durée de mise en place des

armatures, des inserts, durée de coulage). Il est nécessaire de faire quatre arrêts techniques : à la base du linteau, à l'arase supérieure des poteaux, environ 20 m au-dessus de l'ouverture pour la mise en tension des câbles du linteau et au sommet de la tour sous la poutre de couronnement.

Outre la transition du carré au cylindre, expliquée plus haut, la conception du coffrage doit répondre à plusieurs autres défis, notamment la grande ouverture Nord. Le système de coffrage conique, qui doit être utilisé en raison de la géométrie de la tour, nécessite une plate-forme de travail supérieure qui s'étend sur toute la surface de la tour (figure 15), et l'assemblage de tous les coffrages dès le démarrage à la base de la tour. En raison de la dimension de l'ouverture, il n'est pas possible de procéder comme pour les baies de petite taille, pour lesquelles les tiges de montage du coffrage glissant restent en place et sont contreventées pour éviter leur flambement. Il faut ici prévoir de porter la plateforme de travail d'une autre manière sur la hauteur de l'ouverture (figure 16). Et il faut également une structure pour porter le linteau et la poutre-voile au-dessus de l'ouverture (figure 17).

La conception du coffrage permet de répondre à ces deux conditions grâce à une poutre treillis métallique portée par l'outil coffrant. La durée d'interruption du glissement peut également être minimisée grâce à ce système sophistiqué. ▶



16

© GLEITBAU



17

© GLEITBAU



## DES OPÉRATIONS DE MANUTENTION EXTRAORDINAIRES

Les manutentions sont confiées à Hebetec Engineering SA qui a mis en œuvre les techniques de ripage sur coussin d'air (APS) et de levage par câble.

### TRANSLATION SUR COUSSIN D'AIR

La première opération consiste à insérer le système de translation sous le plancher métallique supportant la chaudière du *boiler*, qui repose sur des socles en béton.

Les chemins de glissement (*Skidways light*) sont ripés sur la dalle en béton, puis les modules APS, par groupe de deux, surmontés de leur poutre de répartition, sont, à leur tour, placés sous les points de levage (figure 18).

Une fois le système hydraulique achevé, le *boiler* est décollé des socles sur lesquels il a été construit.

À l'occasion de cette première prise en charge, le poids exact effectif de l'ensemble *boiler/grid* peut être constaté par pesage, il est de 2200 t.

La première étape de ripage en direction de la tour peut avoir lieu (figure 19).

Le linéaire de chemin de ripage disponible étant limité et l'emplacement final encore occupé par les opérations d'abaissement du coffrage glissant, le ripage se fait par étapes successives, en plaçant à l'avancement les chemins de ripage libérés à l'arrière.

La chaudière est ainsi positionnée au centre de la tour en trois étapes.

Avant la dernière étape, l'ensemble des câbles de levage qui n'entravent pas l'entrée du boiler dans la tour sont préalablement installés. Il reste donc à terminer cette opération par l'installation des 6 câbles disposés dans la zone de passage.

La chaudière étant en attente sur les APS en position basse pendant la mise en place de ces derniers.

### LEVAGE PAR CÂBLES

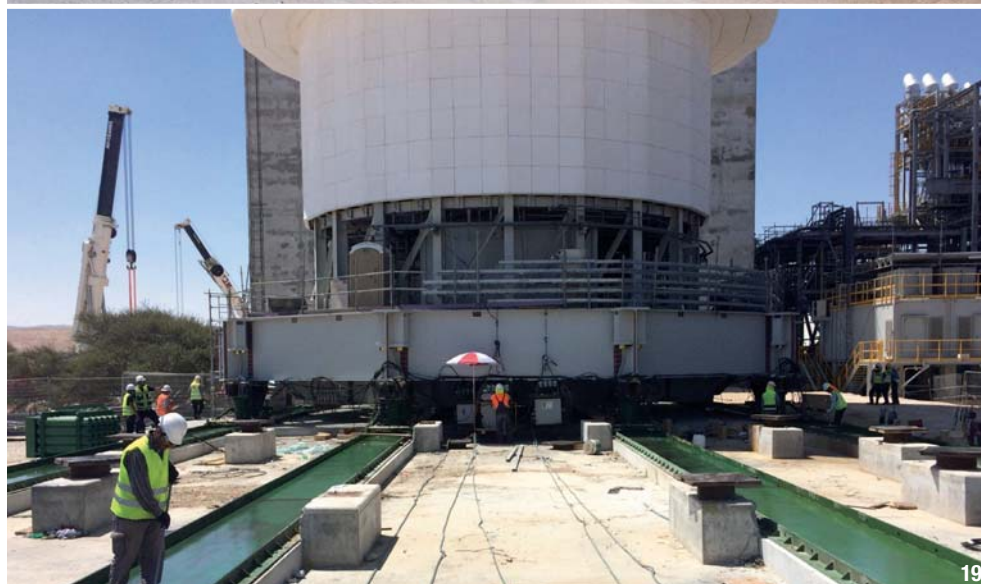
L'insertion des câbles de levage dans les tubes de passage du *grid* et le montage des ancrages d'extrémité étant réalisés, la chaudière peut dès lors être prise en charge par les vérins à câble et commencer son ascension (figures 20 et 21).

Au nombre de 20, les câbles de levage sont constitués de 19 torons de précontrainte chacun et représentent au total un tonnage d'acier de 80 t environ. Le levage se déroule en continu en



18

© HEBETEC



19

© HEBETEC

alternant les équipes de jour et de nuit pendant 5 jours, le rythme étant dicté par le travail de découpe et d'évacuation des torons au fur et à mesure de l'avancement du levage.

Trois roues sont montées sur le plancher métallique pour le guider le long du fût lors de l'ascension, notamment en cas de vent. Le levage est réalisé sous couvert météo.

Au terme du levage, la chaudière est positionnée quelques dizaines de centimètres au-dessus de son altitude finale, afin de faciliter le montage des extensions des poutres du plancher métal-

## QUELQUES DATES

- **Novembre 2014** : lancement des études d'exécution par setec tpi
- **Août 2015** : construction de plancher métallique
- **Octobre 2015 - octobre 2016** : construction de la chaudière
- **Juillet-décembre 2015** : fondation
- **Juin 2016** : démarrage du coffrage glissant
- **Novembre 2016** : mise en précontrainte du linteau
- **Janvier 2017** : achèvement de la poutre de couronnement
- **28 juillet au 2 août 2017** : levage de la chaudière
- **Novembre 2016 - décembre 2017** : mise en place du VPR
- **Janvier 2018** : mise en service

**18- Insertion du système de translation APS.**  
**19- Translation de la chaudière.**

**18- Insertion of the APS travelling system.**  
**19- Boiler travelling.**



© DPR 20

lique, qui permettent à la chaudière de s'appuyer dans les fenêtres prévues à cet effet. Elle reste ainsi suspendue aux câbles une semaine environ pour effectuer le boulonnage des extensions, puis est abaissée et déposée sur ces appuis définitifs.

### CONCLUSION

La tour solaire d'Ashalim est une première en termes d'économie d'énergie, par son importance et sa technologie. De nouveaux développements sont prévus au niveau de la technologie des chaudières pour stocker l'énergie acquise pendant le jour. Les métiers du

génie civil et du levage de haute capacité apportent leur contribution et l'on peut souhaiter de nouveaux débouchés pour nos ingénieristes et entreprises. □

**20- Soulèvement de la chaudière.**

**21- Ascension de la chaudière.**

**20- Lifting up the boiler.**

**21- Boiler raising.**



© DPR 21

### QUELQUES CHIFFRES

**PUISSANCE PRODUITE : 121 MW**

**NOMBRE DE MIROIRS ÉLECTRONIQUEMENT COMMANDÉS : 50 000 u**

**POIDS DE LA TOUR : 30 000 t**

**POIDS DE LA CHAUDIÈRE : 2 200 t en stade de levage**

**VOLUME DE BÉTON : 11 600 m<sup>3</sup>**

**QUANTITÉ DE FERRAILLAGE : 3 200 t**

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : Megalim Solar Power Ltd**

**RESPONSABLE DU PROJET CLÉ EN MAIN, CONCEPTION DE L'USINE ET DE LA CHAUDIÈRE : General Electric's**

**TECHNOLOGIE DU CHAMP SOLAIRE : Brightsource**

**CONCEPTEUR DU PRELIMINARY DESIGN ET CONSTRUCTEUR**

**DE LA TOUR : Ferbeck Industrial Chimneys**

**CONCEPTION, CALCULS ET PLANS D'EXÉCUTION DE LA TOUR BÉTON**

**ET DU PLANCHER MÉTALLIQUE : Setec tpi**

**LEVAGEUR DE LA CHAUDIÈRE : Hebetec**

**CONCEPTEUR ET FOURNISSEUR ET OPÉRATEUR DE L'OUTIL COFFRANT : Gleitbau**

**CALCULS ET PLANS D'EXÉCUTION DU RACK MÉTALLIQUE VERTICAL : Idom**

**Idom**

### ABSTRACT

#### THE ASHALIM SOLAR TOWER IN ISRAEL

AUDREY ZONCO, SETEC TPI - JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI - FRANÇOIS PRONGUÉ, HEBETEC - THOMAS DUM, GLEITBAU - GILLES OUDIN, FERBECK INDUSTRIAL CHIMNEYS

**The Ashalim solar tower** is the tallest tower of this type in the world, with a total height of 240 metres. At the time of its delivery in the first quarter of 2018, it would supply 1.6% of Israel's energy using a field of 50,000 mirrors set up on 300 hectares of land. Designed by Ferbeck Industrial Chimneys and Setec tpi, its construction made use of reinforced concrete and prestressing techniques for the lintels and the foundation. Concreting was performed with a variable-geometry sliding formwork developed by Gleitbau. The solar tower was hoisted using techniques of travelling on sliding pads and lifting by cable reel jacks developed by Hebetec. The design engineering required wind-tunnel tests in the various construction and service configurations, and complex calculations for each construction phase. A fine example of civil works used for renewable energies. □

#### LA TORRE SOLAR DE ASHALIM EN ISRAEL

AUDREY ZONCO, SETEC TPI - JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI - FRANÇOIS PRONGUÉ, HEBETEC - THOMAS DUM, GLEITBAU - GILLES OUDIN, FERBECK INDUSTRIAL CHIMNEYS

**La torre solar de Ashalim** es la torre de este tipo más alta del mundo, con una altura total de 240 m. En el momento de su entrega, en el primer trimestre de 2018, generará el 1,6% de la energía de Israel gracias a un campo de 50.000 espejos dispuestos sobre 300 hectáreas. Diseñada por Ferbeck Industrial Chimneys y Setec tpi, en su realización se han empleado las técnicas del hormigón armado y del pretensado para los dinteles y la cimentación. El hormigonado se ha llevado a cabo mediante un encofrado deslizante de geometría variable diseñado por Gleitbau. El izado del horno solar se ha basado en técnicas de traslación sobre patines deslizantes y de elevación por cilindros hidráulicos tragacable desarrollados por Hebetec. Los estudios han requerido ensayos en túnel de viento de las distintas configuraciones constructivas y de servicio, así como complejos cálculos para cada fase de construcción. Un excelente ejemplo de ingeniería civil al servicio de las energías renovables. □