

APPLICATION DU PROCEDE MENARD VACUUM POUR L'AMENAGEMENT DU SITE DU FUTUR AIRBUS A380 A HAMBOURG

APPLICATION OF THE MENARD VACUUM PROCESS FOR THE CONSTRUCTION OF THE SITE OF THE FUTURE AIRBUS A380 IN HAMBURG

Serge VARAKSIN, Nozay, FRANCE
Jean-Luc CHAUMENY, Hambourg, ALLEMAGNE
Johannes KIRSTEIN, Hambourg, ALLEMAGNE

RESUME – L'usine AIRBUS d'Hambourg jouxte avec une ancienne sablière comblée par l'envasement des alluvions de l'Elbe. Les contraintes d'environnement exigeaient que les méthodes de construction n'occasionnent aucun mouvement dans le temps des vases polluées et nécessitaient le contrôle et l'assainissement des eaux de consolidation. Le procédé Ménard Vacuum a été retenu pour satisfaire à ces exigences.

ABSTRACT – The existing Airbus Factory in Hamburg is bordered by an old sand reclamation area silted in by Elbe river alluvium. Environmental constraints required construction methods eliminating all phenomena of deformation mud waving and uncontrolled pore water discharges. The Menard Vacuum process was selected to meet those criteria.

1. Description du projet et contraintes d'environnement

L'usine Airbus située à Hambourg, en Allemagne, est adjacente à une ancienne sablière qui a été comblée par l'envasement des alluvions de l'Elbe.

L'usine ainsi que la piste d'envol existantes privilégiaient le choix de ce site pour y réaliser la nouvelle usine de montage de l'A 380.

Ce site de 140 hectares devait être mis à disposition d'Airbus par le Port de Hambourg, Maître d'œuvre de cette opération (Fig. 1).

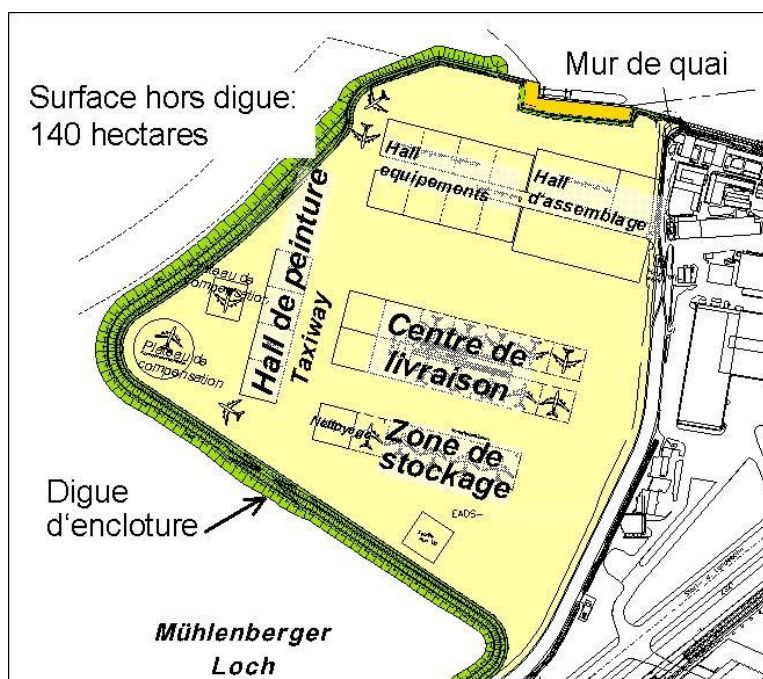


Figure 1 – Site d'Hambourg

Les contraintes d'environnement exigeaient que les méthodes de construction ne provoquent aucun mouvement de vases autres que verticales et que toute eau évacuée par les divers procédés de construction soit traitée, les vases étant chargées d'ammonium et de métaux lourds.

Les délais de mise à disposition des diverses surfaces constructibles ainsi que les critères de tassement n'étaient pas encore définis par Airbus lors de l'Appel d'Offres et une méthode contractuellement définissable devait être proposée pour entreprendre les travaux dans le cadre de garanties qui ne seraient finalisées qu'ultérieurement.

2. Consolidation des sols

Le site contigu à l'usine est en zone de marnage de l'Elbe ; la marée moyenne varie de la cote (-2) à (+2). Durant les périodes de conjonction de haute marée et des vents d'Est, elle peut atteindre + 6.50 m.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques du sol.

Type de sol	Teneur en eau	Densité	Résistance au cisaillement		Module de déformation (sous $\sigma_z = 100 \text{ kN/m}^2$)	Coefficient de consolidation	Coefficient de consolidation secondaire
	W (%)	$\gamma/\gamma' - \text{kN/m}^3$	$\delta'(^{\circ})/c'$ (kN/m ²)	C_u (kN/m ²)	E_s (MN/m ²)	C_v (m ² /a)	C_{α} (-)
Vase	142	13/3	20/0	0.5-5	0.8	0.35	0.03
Argile récente	119	14/4	20/0	2-10	0.9	0.35	0.03
Argile	70	15/5	17.5/10	5-20	1.5	0.5	0.02
Argile Tourbeuse	139	14/4	20/5	5-20	0.9	0.4	0.03
Tourbe	240	11/1	20/0	5-15	0.5	≥ 0.4	0.04

L'épaisseur des couches compressibles varie de 5 à 14 m et une couche de vase de surface de 3 à 12 m rend toute accessibilité du site impossible par voie terrestre, les temps de flottaisons de pontons étant réduits à 1.½ h par marée. Les cohésions de surface étant de l'ordre de $C_u \approx 0.5 \text{ kN/M}^2$, ni circulation d'engins ni remblai de plus de 15 cm n'étaient envisageables sans rupture. Les tassements prévus pour atteindre la cote finale + 5.50 m variaient de 2.50 à 4.00 m, avec des tassements secondaires importants dans les couches organiques.

3. Concept de l'Ingénieur

Un Appel d'Offres en trois lots a été lancé par le Maître d'œuvre :

Lot 1 : Le mur de quai permanent ainsi qu'une enceinte temporaire en palplanches du futur site destinée à contenir les vases devaient permettre de monter le niveau de l'eau pour assurer la flottaison des pontons et se mettre à l'abri des grandes marées.

Lot 2 : Ce lot prévoyait après la remontée de l'eau par remplissage de l'enceinte à la cote +4.00 m, un saupoudrage de 3 000 000 m³ de sable en provenance d'une île de l'Elbe située à 5 km ainsi que d'un site à plus de 180 km. Ce saupoudrage en couches successives de 30 cm devait éviter tout mouvement des vases, ceci jusqu'à la cote + 3.00 m.

Ensuite, un rabattement de nappe à environ 0.7 m devait permettre l'installation de 13 000 000 de ml de drains verticaux dans les zones non structurales et 204 000 m² de chargement par le vide (Technique Ménard Vacuum), afin de monter les remblais en quelques semaines et atteindre les critères de déformation dans un temps record sans risque de rupture.

La mise en place était prévue à la cote finale, augmentée des tassements calculés afin d'arriver à cette cote finale du projet dans les délais de livraison et éviter l'apport d'un excédent de sable en surcharge.

Lot 3 : Construction de la digue permanente sur les terrains consolidés et enlèvement des palplanches temporaires.

4. Variante de l'entreprise (Fig.2)

L'association de l'entreprise de travaux maritimes « Moebius » et du spécialiste d'amélioration des sols « Ménard Soltraitement » a présenté une solution unique permettant d'éviter 2.8 km d'enceinte de palplanches en construisant la digue permanente prévue au lot 3 dans le cadre du lot 1 en une période de 8 mois, ceci avant les grandes marées. Une méthode de calcul contractuelle a permis de dimensionner et de quantifier les travaux d'amélioration des sols au fur et à mesure de l'avancement des travaux en fonction des délais et critères de tassements résiduels négociés entre le Maître d'œuvre et son client : Airbus Industries (Programme Menard TARAO).

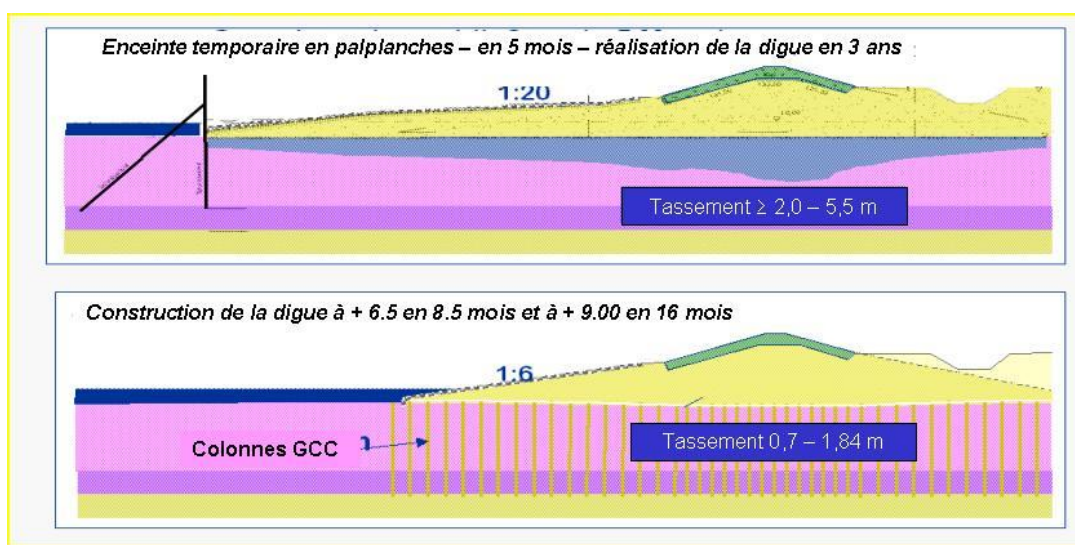


Figure 2 . Principe de la consultation - Variante Lot 1 : MÖBIUS - MENARD

La technique de G.C.C. (Colonnes de sable confinées dans une chaussette de géotextile à haute résistance) avait été mise en œuvre auprès du Port de Hambourg par la société Moebius lors d'une planche d'essais et rendait possible la construction d'une digue en 3 étapes de chargement sur une période de 3 mois (Fig 3), ceci dans le cadre des contraintes d'environnement et sans créer de rupture.



Figure 3 : Réalisation de la digue du Polder

Les techniques de drains verticaux et Ménard Vacuum permettaient de consolider les vases dans les délais et critères.

5. Généralités sur le procédé Menard Vacuum

La Consolidation Atmosphérique Ménard est une variante du préchargement classique par surcharge associée à des drains verticaux. Elle consiste principalement à créer une dépression sous une membrane étanche, maintenue par un système de pompe eau/gaz relié à un réseau de drains horizontaux.

Le principe d'installation est présenté sur la figure 4.

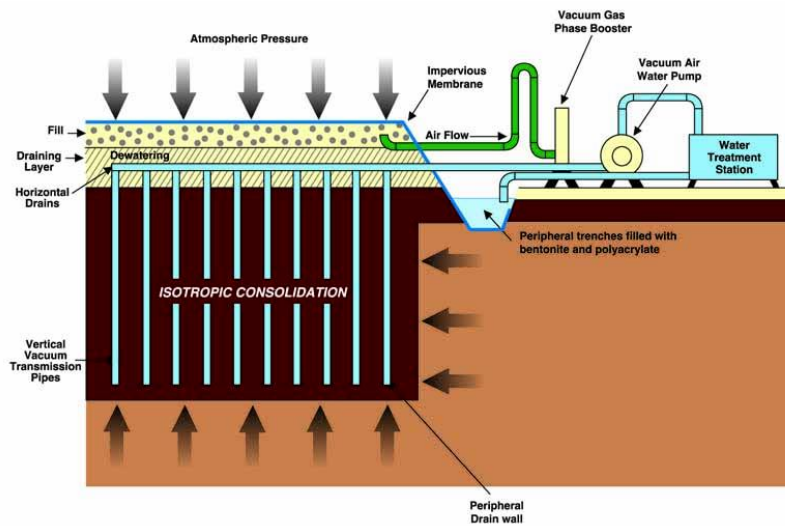


Figure 4 – Procédé Ménard Vacuum

L'aspect théorique de ce procédé a déjà été largement développé (Cognon, 1991 et Cognon & Al, 1995) et nous rappellerons les principaux aspects techniques que la Consolidation Atmosphérique engendre.

Tout d'abord, pour une meilleure compréhension du cheminement des contraintes sous une dépression, l'approche oedométrique est donnée en figure 5, ci-après.

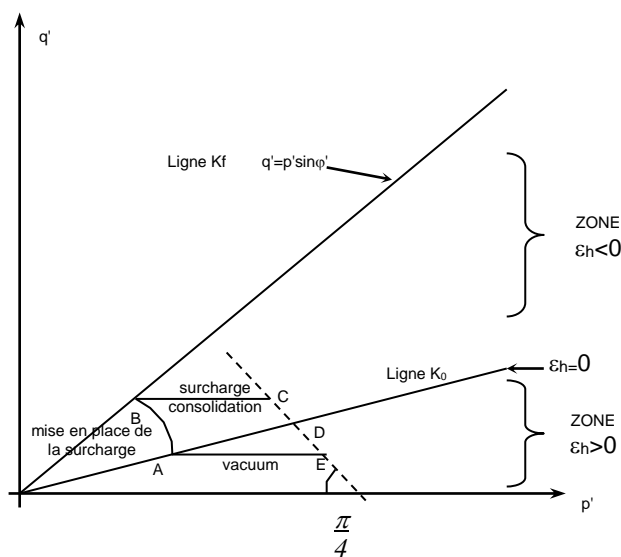


Figure 5 – Chemin des contraintes

Pour un sol normalement consolidé, le point A suit le chemin A – B – C lors du préchargement classique alors qu'il se déplace en théorie vers E sous une dépression. En réalité, le point se trouve entre D et E. Pratiquement, cela signifie que la Consolidation Atmosphérique empêche tout fluage latéral contrairement au préchargement classique. Cela a été constaté sur différents sites (Pahud & Al, 1996).

De plus, la dépression génère une cohésion apparente dans le remblai drainant (selon le principe du paquet de café sous vide), qui, combinée aux sols mous déprimés, élimine tout risque de rupture à court terme et permet donc un remblaiement beaucoup plus rapide jusqu'à la hauteur désirée.

6. Application du procédé selon un principe de "Corset" stabilisant, zone du Hall d'Assemblage

Dans la planification d'origine, la fermeture de la digue d'enclôture étant prévue ultérieurement, une solution a dû être trouvée pour livrer cette zone en 8 mois.

Le concept du groupement Moebius – Ménard pour la zone Nord proposé en dernière minute peut être résumé ainsi (figure 6) :

- Réalisation d'une « diguette » d'enclôture en sacs de sable fondée sur GCC sur une largeur de 15 m pouvant résister à une poussée de 2.50 m de hauteur d'eau.
- Remplissage du bassin de 2.5 m d'eau et « saupoudrage » de sable sur un géotextile de fond jusqu'au niveau + 2.50.
- Installation d'un corset de vacuum en périphérie intérieure par rapport à la digue. La fonction de ce corset était d'assurer la stabilité des remblais hydrauliques de la plateforme, qui devait être montée à la cote +9.50 en quelques semaines.

A cet effet, la combinaison de la préconsolidation des argiles sous le vacuum, son augmentation de résistance au cisaillement ainsi que la cohésion apparente sous l'effet du vide dans les sables de surface ont été pris en compte dans le dimensionnement de ce corset de 26 m de large.

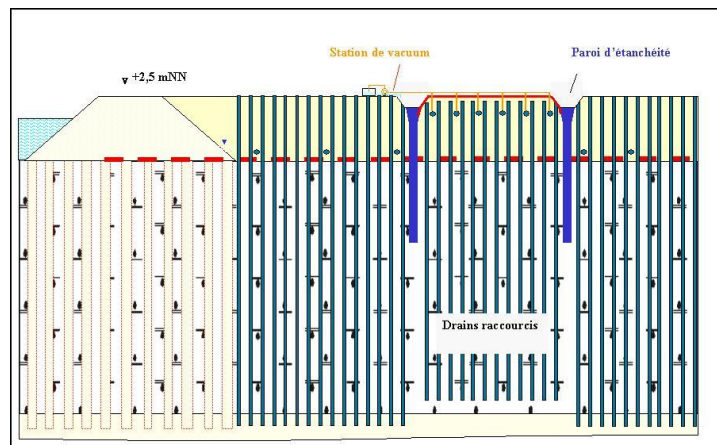


Figure 6 : Installation d'un corset de "Menard Vacuum"

L'analyse des tassements et de la stabilité par la méthode des éléments finis ont permis de démontrer qu'une montée du remblai de la cote + 2.5 à + 9.5 serait stabilisée par le "corset Vacuum" et consolidée selon les critères du client. La figure (7) illustre l'évolution des tassements dans chaque couche de terrain en place (tassomètres multipoints) ainsi que les tassements de surface comparés aux prévisions effectuées sur base des essais de laboratoire et l'analyse du programme TARAO, permettant de considérer tous les paramètres de Vacuum.

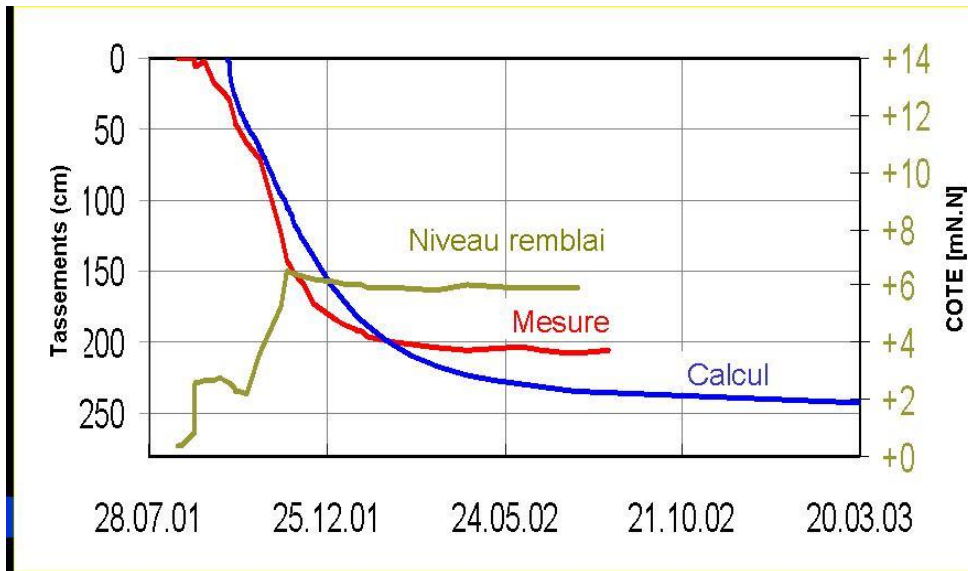


Figure 7 – Tassements – Zone Nord : calculés mesurés

7. Application au procédé "Menard Vacuum" dans la zone de dallage et taxiway

Dans les zones de dallage (tablier, taxiway), les critères plus sévères de 10 cm de tassement résiduel ainsi qu'un tassement différentiel réduit ne permettaient pas de résoudre les problèmes de stabilité associés à la montée des remblais. La technique du « Ménard Vacuum » (fig. 8) a donc été retenue pour ces zones.



Figure 8 – Zone de dallage traitée par la technique du Menard Vacuum, bloc de 70 000 m²

De plus, il s'agissait de zones à forte épaisseur d'argile (14 m) avec des passages tourbeux importants. Une sur-consolidation importante devait être obtenue afin de réduire les tassements secondaires dans le critère des 10 cm résiduels, sous les charges de remblai, dallages et exploitation.

L'installation du système de pompage sous vide a requis l'utilisation de trancheuses de grande capacité (8 m de profondeur) afin d'imperméabiliser les couches supérieures de sable « saupoudré » ainsi que les diverses lentilles de sable en profondeur. La tranchée était équipée d'un système d'injection de Bentonite par le biais d'une rampe d'injection montée sur le bras de la trancheuse (Fig. 9).



Figure 9 : Vacuum Taxiway – réalisation de l'écran étanche

14 stations de pompage ont été installées dans des virolles de 2.5 m de diamètre et 8 m de hauteur, ceci afin de mettre en place les installations de pompage sur la phase "eau-air" le plus près possible de la nappe et permettre la pose des remblais de plate-forme et de compensation de tassements (2.5 à 3.5 m) (figure 10) par voie hydraulique.



Figure 10 – Pose des virolles de protection des pompes eau-air

Les feuilles de calcul du comportement en fonction du temps, lors des chargements successifs, sont résumées dans les figures (11a et 11b). Ceci tient compte des variations de la nappe phréatique (4 à 6 m de marée), les drains et passage des remblais sous la nappe lors de tassements pouvant atteindre plus de 300 cm.

Hambourg A380 DS 59 - X11017-B62 - (4.19 u.4.20) - +5,50mNN - Raster: 0,60m			Fill parameters :							
MVC-Block Rollwege in FS			Initial elevation :				Density (KN/m ³):			
LOAD PARAMETERS			Initial fill thickness above GWT :				Cohesion (KPa):			
			0,50				27,5			
			3,50				Friction angle (°):			
			0,50				3,10			
Parameter	unit		Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6	Step7	Step8
Fill density	KN/m ³	γ_t	18	18	18	18	18	18	18	18
Fill height above GWT (incl. exist. fill, beginning of step, no settlement considered)	m		0,50	1,00	1,00	2,00	5,50	5,50	5,23	5,23
Maintain elevation (yes=1, no = 0) ?			0	0	0	0	0	0	0	0
Fill height above GWT (incl. exist. fill, end of step)	m	H_t	-0,28	-0,38	-1,03	-0,46	2,30	2,26	2,00	1,86
Fill thickness below GWT (incl. settl, end of step)	m	W_t	3,88	4,48	5,13	5,56	6,30	6,34	6,33	6,47
Fill settlement (end step)	m		0,78	1,38	2,03	2,46	3,20	3,24	3,23	3,37
Fill width and length	m	(Lxl)	infinite	infinite	infinite	infinite	infinite	infinite	infinite	infinite
Vacuum Pressure	KPa	V	0	0	60	80	80	25,6	25,6	35,2
Coefficient of Vacuum		α_v	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Duration of loading	days	t	25	74	62	57	221	149	39	1825
Time at beginning of step	days		0	25	99	161	218	439	588	627
Date at beginning of step			22/08/2002	16/09/2002	29/11/2002	30/01/2003	28/03/2003	04/11/2003	01/04/2004	10/05/2004
Fill elevation from GWT (begining step)	m		0,50	1,00	1,00	2,00	5,50	5,50	5,23	5,23
Fill elevation from GWT (end step)	m		-0,28	-0,38	-1,03	-0,46	2,30	2,26	2,00	1,86
Elevation at end of step	m		3,22	3,12	2,47	3,04	5,80	5,76	5,50	5,36

INITIAL SOIL PARAMETERS										
Layer	unit		1	2	3	4	5	6	7	8
Thickness	m	H	5,10	2,50	1,00	0,30	1,00	0,80		
Void ratio Tarao		e_t	3,7	2,7	3,6	3,6	1,4	2,7		
Void ratio		e_0	3,3	2,7	2,7	2,7	1,4	2,7		
Primary consolidation Tarao		C_{ot}	0,95	0,83	0,90	0,90	0,45	0,83		
Primary consolidation		C_c	1,15	0,95	1,00	1,00	0,45	0,95		
Secondary consolidation Tarao		C_{at}	0,141	0,110	0,184	0,184	0,024	0,110		
Secondary consolidation		C_{α}	0,030	0,030	0,040	0,040	0,010	0,030		
Density	KN/m ³	γ_s	13,00	14,00	12,00	12,00	16,00	14,00		
Cohesion	KPa	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Cohesion increase		$\Delta C_u / \Delta \sigma'$	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		
Internal friction angle		ϕ	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00		
Effective stress	KPa	σ_o'	7,65	20,30	26,30	27,60	30,90	35,50		
Influence factor of surcharge	%	I	100	100	100	100	100	100		
Calibration coefficient		β	1	1	1	1	1	1		

DRAINAGE PARAMETERS										
Parameter	unit		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	Layer 7	Layer 8
Drain spacing (square)	m	D	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5		
Drain diameter (MCD)	m	d	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
Coefficient of horizontally drained consolidation	m ² /yr	C_h	0,35	1,6	1,2	0,4	0,7	0,4		

Figure 11a – Paramètres de sols

La figure (12) illustre le comportement de la plaque de tassement au droit du forage lors des diverses phases de travaux. Ceci comprend les déformations des vases non drainées sous le poids de la plate-forme de travail, le comportement des vases après l'installation des drains, la mise en place de la dépression, les phases successives de remblai et le comportement du sol après la réalisation du vide.

Les tassements observés ont varié de 195 cm à 320 cm en fonction de l'épaisseur des vases et l'épaisseur de tourbe.

Les dépressions durant la période de mise sous vide ont avoisiné les 70 Kpa avec quelques pertes de dépression (10-12 %) durant les périodes de gel important ; ceci dû au manque d'eau de saturation dans les tranchées périphériques.

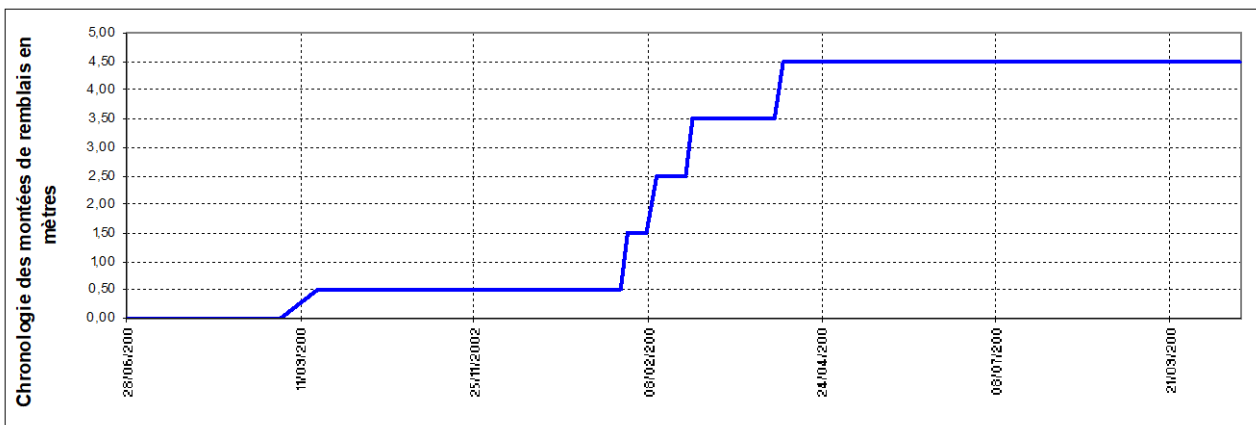
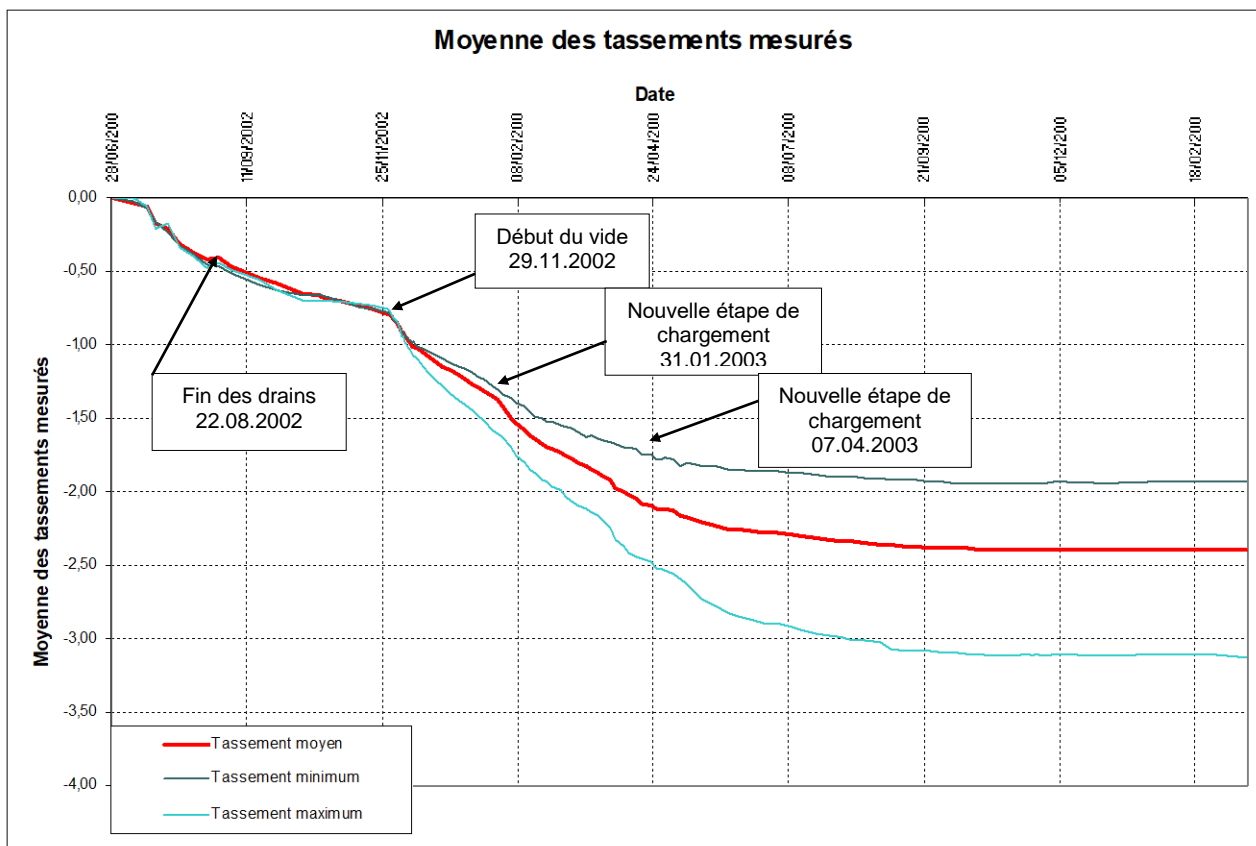


Figure 12 – Suivi du comportement moyen des tassements

8. Conclusion

La technique de consolidation Ménard a été utilisée pour deux applications différentes.

Dans la "Zone Nord" du bâtiment, un corset périphérique de 26 m de largeur a permis la montée de 9.5 m de remblais en deux phases : 2.5 m en 1.5 mois et 7.5 m en trois semaines, ceci sur des terrains dont la cohésion non drainée ne dépassait pas 0.5 KN/m² dans les couches supérieures. De plus, la cohésion des couches de sable de surface ont apporté le supplément de moment résistant. Dans les zones de dallage et de plus grande épaisseur de vase et de tourbe, la réalisation du pompage sous vide a permis la montée des remblais sans risque de stabilité et la préconsolidation ainsi que le vieillissement des couches organiques sous surcharge du vide dans un délai extrêmement court.

Les déformations, à ce jour, c'est-à-dire 5 mois après la fin du pompage, sont inférieures au centimètre, et bien en-deça des critères du projet.

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cognon J.M. (1961) Vacuum consolidation. *Rev. French Geotechnique # 57 (Oct.)*, 37-47
- Cognon J.M. (1961) Juran, I. & S. Thevanayagam (1994) Vacuum consolidation technology – principles and field experience. *Proceedings of Settlement '94 – Sponsored by ASCE – Held June 16-18, 1994, College Station, Texas*
- Faisal A., Yee K. and Varaksin S. (1997) Treatment of Highly Compressible Soils. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Kuching, Sarawak, March 1997.*
- Magnan J.P. (1989) Analysis of Vertical Drains in Soft Clays: the Case of Muar Flats Test Embankments. *International Symposium on Trial Embankments on Malaysian Clays, Nov.*
- Massé F., Spaulding C., Pr Ihm Chol Wong, Varaksin S., (2001) Vacuum consolidation : a review of 12 years of successful development. *Geo-Odyssey-ASCE/VIRGINIA TECH-Blacksburg, VA USA – June 9-13, 2001*
- Reiner J., Stadie R., (2002) Airbus-Werkserweiterung für das Grossraumflugzeug A380 n Hamburg-Finkenwerder. *Geotechnisches Konzept der Flächenaufhöhung im Mühlenberger Loch*
- Soares M., Leroueil S., Varaksin S. and Al. (19) Vacuum Preloading of a Sensitive Champlain Sea Clay Deposit
- Varaksin S., (2003) Aménagement à Hambourg de la nouvelle usine AIRBUS 380 gagnée sur des vases hautement compressibles. *Salon et Congrès des Travaux Publics et du Génie Civil, Paris*
- Yea K. and T.W, Tan (2001) Vacuum Consolidation for Soft Clays. *Conspectus Journal, Housing Development Board, Singapore, July 2001*