

Canal Seine Nord Europe

Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique

Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du Canal Seine Nord Europe

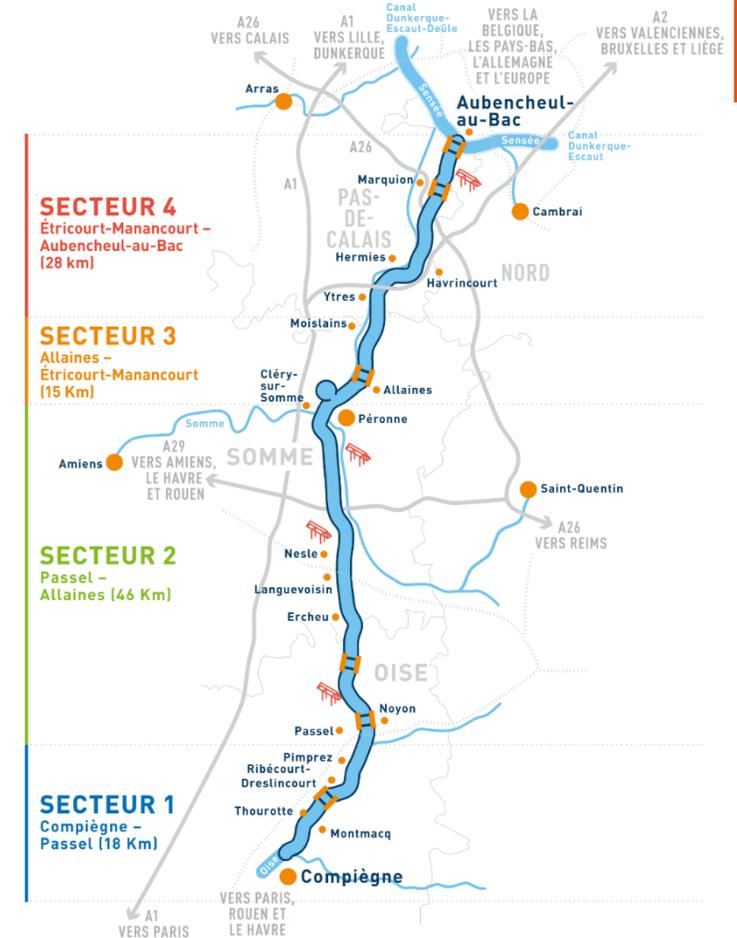
A. MEHENNI (Bouygues Travaux Publics)
G. POTIE (SCSNE)

Canal Seine Nord Europe



1,5 km dans le NORD
 26,5 km dans le pas de calais
 45 km dans la somme
 34 km dans l'OISE

Un réseau de 110 km réalisé par 4 partenaires

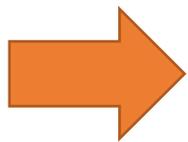


Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
 Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE



Objectifs environnementaux du CSNE

- **Préservation de la ressource en eau**
- Lutte contre les inondations (Ecrêtement des crues Oise et Somme)
- Création d'un canal vivant (voie douce, zones de compensations)
- Limitation de l'empreinte énergétique du projet (PV, bassins d'épargne,...)
- Contribution du projet à la limitation de l'empreinte carbone (fluvial 2 à 4 fois moins de carburant et 3 fois moins de CO₂ que la route)
- **Réutilisation des déblais issus de l'excavation du canal** (largement excédentaire 70 Mm³ pour 40 Mm³)



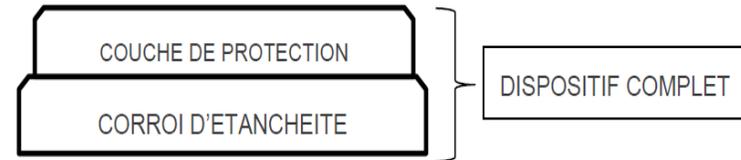
Dispositif d'étanchéité avec des matériaux du site

Objectifs du dispositif d'étanchéité

✓ Réutiliser les matériaux excavés sur le projet :

En protection : limons A1 et A2 et craies

En étanchéité : limons A1 et A2



✓ Obtenir une perméabilité inférieure à 1×10^{-8} m/s

✓ Valider la tenue à l'érosion (jets d'hélice, batillage)

✓ Valider la tenue aux chocs (colis, chute et trainée d'ancres, étrave de péniche)

Marché SCNE : Études et essais de perméabilité sur des corrois d'étanchéité

○ Groupement :



○ Sous-traitants :



Méthodologie de l'étude

2019

2022

Etude en laboratoire

Etude in situ

Caractérisation
des matériaux à
l'état naturel

Etude de formulation de
traitement pour la couche
d'étanchéité

Etude de formulation de
traitement pour la couche
de protection

Suivi de l'évolution des
caractéristiques des
matériaux en laboratoire

Réalisation des planches
expérimentales
d'étanchéité

Réalisation des planches
expérimentales de
protection

Réalisation de
bassins de rétention
d'eau

Suivi dans le temps de
l'évolution des caractéristiques
des matériaux

Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Résultats des études en laboratoire

- Etude de formulation de la couche d'étanchéité : Limons avec traitement aux produits argileux

	Traitement	Taux de compactage	Masse volumique sèche	Teneur en eau	Conductivité hydraulique
		(%)	(Mg.m ⁻³)	(%)	(m.s ⁻¹)
Limon brun	NON	95	1,76	W _{OPN +1} = 15,8%	4,4.10 ⁻⁹
	NON	95	1,76	W _{OPN +1} = 15,8%	1,8.10 ⁻⁹
	2% Bentonite	95	1,68	W _{OPN +1} = 16,7%	2,4.10 ⁻⁹
	2% Kaolinite	95	1,77	W _{OPN +1} = 15,5%	9,2.10 ⁻¹⁰
Limon beige	2% Bentonite	95	1,68	W _{OPN +1} = 16,3%	9,4.10 ⁻¹⁰
	4% Bentonite	95	1,68	W _{OPN +1} = 16,3%	4,1.10 ⁻¹⁰
	4% Bentonite	98	1,73	W _{OPN +1} = 16,3%	3,0.10 ⁻¹⁰
	2% Kaolinite	95	1,74	W _{OPN +1} = 15,8%	1,4.10 ⁻⁸

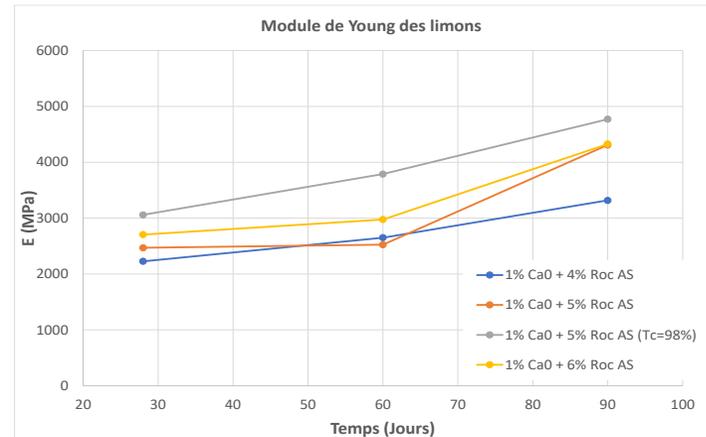
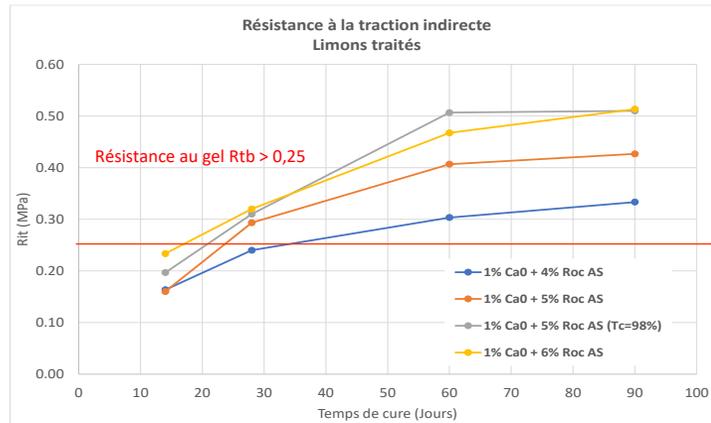
✓ **Perméabilité obtenue en laboratoire (compactage dynamique) < 1 x 10⁻⁸ m/s**

+ impact du mode de compactage (statique et dynamique)

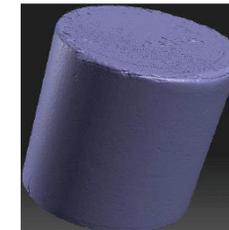
+ impact du prétraitement à la chaux

Résultats des études en laboratoire

- Etude de formulation de la couche de protection : **Limons** avec traitement aux liants hydrauliques



1. Eprouvette avant essai

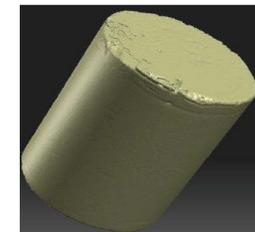


2. Scan 3D de l'éprouvette avant essai

Résultats essai JET :
 $\tau_{c\min} > 1100$ Pa



3. Eprouvette après essai



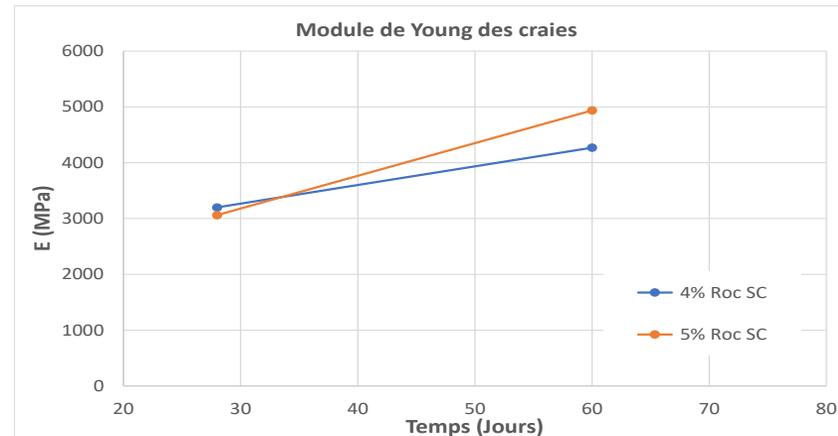
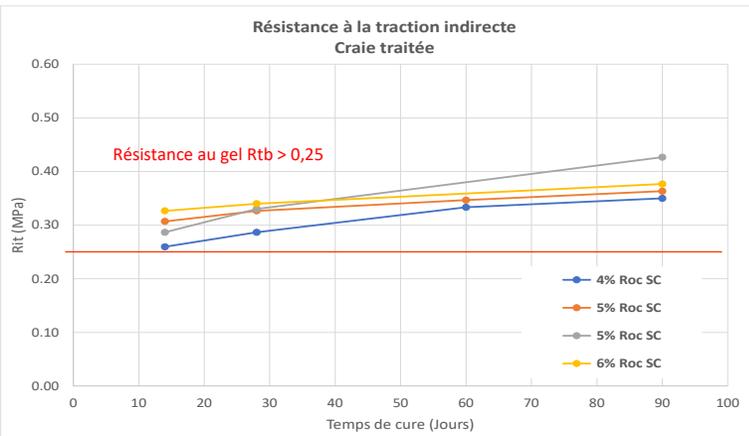
4. Scan 3D de l'éprouvette après essai

- ✓ Résistance au gel vérifiée
- ✓ Excellentes caractéristiques mécaniques (E/Rtb/Rc)
- ✓ Excellente résistance à l'érosion externe (pas d'érosion avec l'essais JET)

Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Résultats des études en laboratoire

- Etude de formulation de la couche de protection : **Craie** avec traitement aux liants hydrauliques



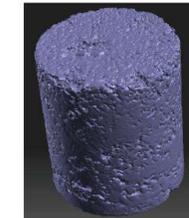
1. Eprouvette avant essai



2. Eprouvette avant essai



3. Eprouvette après essai



4. Scan 3D de l'éprouvette après essai

Résultats essai JET :
 $\tau_{c_{min}} > 1100$ Pa

- ✓ Résistance au gel vérifiée
- ✓ Excellentes caractéristiques mécaniques (E/Rtb/Rc)
- ✓ Excellente résistance à l'érosion externe (pas d'érosion avec l'essais JET)

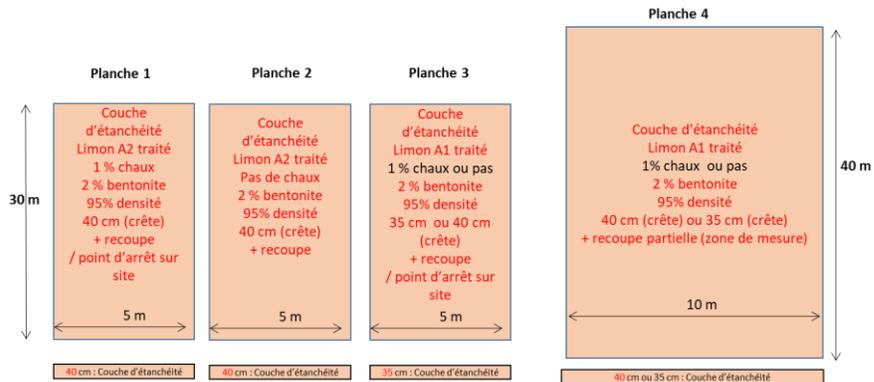
Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Etude in situ

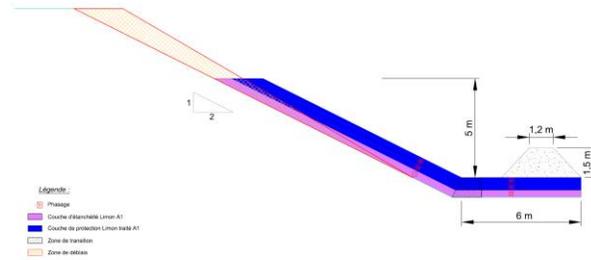
Illustration des planches réalisées

- Couches d'étanchéité
- Couches de protection
- Couches avec compactage en talus
- Bassins

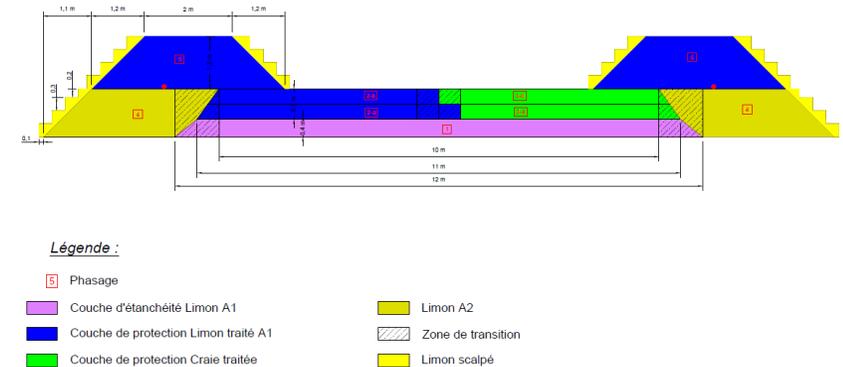
Planches horizontales



Planches inclinées



Bassins



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Etude in situ

- Réalisation des planches



Maîtrise des différentes étapes de réalisation et de contrôle

Etude in situ

- Réalisation des planches



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Etude in situ

- Réalisation du bassin



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Etude in situ

- Réalisation du bassin



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Etude in situ

- Réalisation du bassin



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Etude in situ

- Quelques résultats : couches d'étanchéité

		Epaisseur moyenne atteinte	Densité moyenne obtenue
Planche 1		35 cm après recoupe	99,0 %
Planche 2	Partie supérieure	42 cm après recoupe	96,8 %
	Fond de couche		95,9 %
Planche 3	Partie supérieure	36 cm après recoupe	101,6 %
	Fond de couche		101,1 %
Planche 4	Partie supérieure	37 cm	100,9 %
	Fond de couche		99,1 %

A2 – chaux + bentonite

Perméabilité - planche P1			
Essais initiaux		Essais complémentaires (09-10/11/2020)	
P1-1*	3.91E-09 m/s	Inf1	4.20E-09 m/s
P1-2	2.28E-09 m/s	Inf2	9.50E-10 m/s
P1-4	1.04E-09 m/s		
moyenne	2.41E-09 m/s	moyenne	2.58E-09 m/s

A2 – bentonite

Perméabilité - planche P2			
Essais initiaux		Essais complémentaires (09-10/11/2020)	
P2-1*	1.05E-08 m/s	Inf3	8.80E-11 m/s
P2-3	4.31E-10 m/s	Inf4	5.60E-10 m/s
P2-4	2.00E-09 m/s		
moyenne	4.31E-09 m/s	moyenne	3.24E-10 m/s

A1 – chaux + bentonite

Perméabilité - planche P3			
Essais initiaux		Essais complémentaires (09-10/11/2020)	
P3-1	9.07E-08 m/s	Inf5	5.90E-09 m/s
P3-2	2.40E-10 m/s	Inf6	1.10E-08 m/s
P3-3*	7.89E-09 m/s		
moyenne	3.29E-08 m/s	moyenne	8.45E-09 m/s

Planche finale retenue :

Perméabilité - planche P4	
P4-2	7.22E-10 m/s
P4-3	9.14E-10 m/s
P4-4	3.49E-10 m/s
moyenne	6.62E-10 m/s

A1 – bentonite

✓ Perméabilité obtenue < 1×10^{-8} m/s

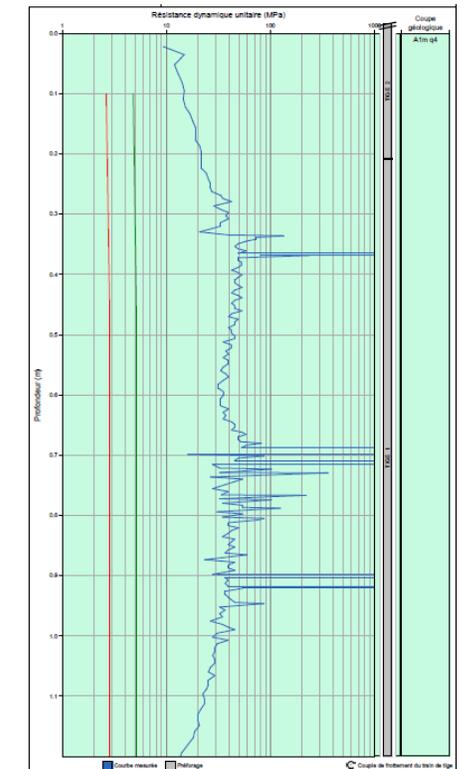
Etude in situ

- Quelques résultats : couches de protection

		Epaisseur moyenne atteinte	Densité moyenne obtenue	Ecart-type sur densités
Planche 5 protection	Protection 1/2	32 cm	98,9 %	1,4 %
	Protection 2/2	26 cm (épaisseur totale 58 cm)	95,4 %	2,6 %
Planche 6 protection en craie	Protection 1/2	25 cm	101,4 %	2,0 %
	Protection 2/2	36 cm	102,9 %	2,0 %
Planche 7 protection	Protection 1/2	30 cm	96,7 %	1,8 %
	Protection 2/2	30 cm (épaisseur totale 60 cm)	98,7 %	1,2 %

Pour les limons et la craie, traités aux liants hydrauliques:

- ✓ Pas d'érosion
- ✓ Excellentes résistances mécaniques



Comparaison des résultats labo et In situ

- Couches d'étanchéité

	Modalités de traitement	Perméabilité labo ($\cdot 10^{-8}$ m/s) (densité 95 %)		In situ	
		Confection classique	Confection dynamique	Densité moyenne	Perméabilité ($\cdot 10^{-8}$ m/s)
Planche P1	A2 – 2% bentonite – 1% chaux	2,5	Non testé	99 % (1)	0,08 à 0,4 [0,4]
Planche P2	A2 – 2% bentonite	0,7	0,24	96,3 % (2)	0,01 à 1 [0,1]
Planche P3	A1 – 2% bentonite – 1% chaux	4	Non testé	101,3 % (2)	0,01 à 1 [0,5]
Planche P4	A1 – 2% bentonite	5,5	0,09	100,5 % (1/2)	0,06 à 0,1

- Couches de protection

	Modalités de traitement	Essais JET laboratoire (compactage 98 %)	Essais JET in situ
Planche P5	A1 – 5% liant (Roc AS) – 1% chaux (CaO)	Contrainte critique $T_c > 1,25$ kPa (limite appareil) Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)	Contrainte critique $T_c > 200$ Pa (limite appareil) Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)
Planche P6	Craie – 5% liant (Roc AS)	Contrainte critique $T_c > 1,12$ kPa (limite appareil) Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)	Contrainte critique $T_c > 200$ Pa (limite appareil) Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)

Bassin mis en eau (1 an) et campagne d'essais 2021

- Suivi du niveau d'eau et remplissage au besoin (2020/2021)
- Vidange du bassin (11/2021)
- Relevé de l'état général du bassin
- Réalisation de fouilles en gradin
- Réalisation d'essai :
 - JET
 - Perméabilité
 - Pénétrromètre dynamique
 - Lâché d'ancre et trainée d'ancre



État du bassin après 1 an de mise en eau

- Dépôts superficiels seulement (matériaux issus des talus) et l'enduit de protection est toujours en place
- Aucune dégradation dans l'état de surface (craie ou limon)



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Evolution de l'état du bassin

- Très grandes difficultés pour réaliser les fouilles (matériaux très durs)



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Evolution de l'état du bassin



Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Evolution de l'état du bassin

- **Résultats des essais sur la couche de protection**

- ✓ Excellentes performances mécaniques (refus au pénétromètre dynamique dans la majorité des essais)

- ✓ Pas d'érosion au JET : (avec un nouveau dispositif optimisé de l'INREA)

Contrainte critique minimale estimée : 1400 à 2000 Pa (en surface et en profondeur)

- ✓ Performances hydriques (pas un critère pour la couche de protection)

Perméabilité moyenne du limon : < à 1,5 E-08 m/s

Perméabilité moyenne de la craie : < à 5,5 E-10 m/s



Essai	Craie traitée ou limons traités	Position de l'essai	τ_{cmin} (Pa)	Vitesse d'impact maximum (m.s ⁻¹)
1	Craie traitée	Surface fond bassin	1419	18.5
2	Craie traitée	Fouille -25cm/fond bassin	1642	19.9
3	Craie traitée	Surface fond bassin	1646	19.9
4	Limons traités	Fouille -32cm/fond bassin	1669	20
5	Limons traités	Surface fond bassin	1784	20.7
6	Limons traités	Fouille -35cm/fond bassin	1875	21.2
7	Limons traités	Fouille -18cm/fond bassin	1911	21.4
8	Limons traités	Surface fond bassin	1839	21

Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique
 Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du CSNE

Evolution de l'état du bassin



Hauteur de chute 3 à 4 m
Masse de l'ancre 800 kg



Sur la craie :
Profondeur de l'impact de la chute
2 à 4 cm



Sur la craie :
Profondeur de l'impact de la trainée (4 km/h)
Pas d'impact

Comparaison avant mise en eau Vs 1 an après mise en eau

Evolution des paramètres de sols (limon et craie) après 1 an d'immersion

- ✓ Perméabilité : valeurs stables
- ✓ Résistance mécanique : résistances mécaniques plus élevées (aucune dégradation en surface et gain de résistance en profondeur)
- ✓ Erosion : résistances à l'érosion stables à plus élevées
- ✓ Impact du chute d'ancre : limité a quelques centimètres dans les conditions les plus défavorables (chute sans eau)
- ✓ Impact de la trainée d'ancre : pas d'impact

Tendance confirmée en laboratoire après 1 an d'immersion (comportement mécanique)

Conclusion

- Les travaux réalisés dans le cadre du marché des planches expérimentales ont permis de monter que **le dispositif d'étanchéité est viable** (même en conditions météo extrêmes et avec un matériau assez défavorable (silts moins argileux))
- **La maîtrise des conditions de réalisation** constitue le facteur primordial pour atteindre les performances souhaitées pour un dispositif d'étanchéité en sols traités (identification des gisements, réalisation de planches in situ, contrôle continu durant toutes les étapes, respect des dispositions constructives,...)
- La mise en place d'un complexe d'étanchéité en sols traités doit **s'accompagner impérativement de dispositions constructives indispensables à ce type de matériaux**, a titre d'exemple :
 - Couche d'étanchéité : protection immédiate contre le séchage et l'apparition des fissures de dessiccation
 - Couche de protection : enduit de cure, protection durant la phase de prise hydraulique
 - A cela s'ajoute les dispositions constructives usuelles à ce type de travaux
- Le suivi de l'état des planches sera maintenu avec une mise en eau du bassin sur une durée plus longue



Merci de votre attention