

Valorisation de sédiments à teneur en eau élevée en génie côtier : construction de la digue de Xiapu (Chine)

Xiao WANG ^{1,2}, Daniel LEVACHER ¹, Tianxue ZHONG ²

1. Normandie Université, Unicaen, UMR 6143 CNRS - M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.

wangxiao@hotmail.fr ; daniel.levacher@unicaen.fr

2. Jiangsu Kun Ze Technologie, Floor 5, Building B1, Ruan Jian Da Dao street, quartier Du Yu Hua Tai district, Nanjing, Chine.

Résumé :

La rareté des matériaux naturels, la notion d'économie circulaire, la renouvelabilité des ressources en agrégats amènent les projeteurs à reconsidérer certains concepts d'ouvrages côtiers. En construction côtière, une ressource de proximité concerne les sédiments aux médiocres propriétés géomécaniques. Ces sédiments doivent être traités, stabilisés et/ou solidifiés pour acquérir des performances suffisantes pour être substitués aux matériaux naturels. A cela la nécessité de développer des nouvelles technologies de stabilisation/solidification s'avère urgente pour diminuer le temps d'exécution des projets de construction littorale, devant faire face à la rareté des matériaux naturels disponibles sur le territoire. Dans cette communication, est relatée la construction d'une partie de digue sur 200m pour un projet de digue d'une longueur totale de 2km sur une île. Des sédiments aux faibles propriétés sont disponibles à proximité de l'ouvrage, ils doivent être traités pour être utilisés en lieu et place de matériaux classiques prévus dans le corps de la digue. Le concept même de la digue est revu. Les sédiments sont mélangés à l'aide d'un liant, puis à l'état frais sont pompés et transportés pour remplir des sacs de géotextiles ou géotubes[®] et finalement se solidifient pour acquérir à 28 jours les caractéristiques exigées par le projet. Des essais de consistance sur le mélange sédiment-liant à l'état frais ont été nécessaires pour assurer le transport et le remplissage des géotubes[®] en relation avec le temps de prise et les conditions de chantier (température, teneur en eau du sédiment, dosage en liant). De ces essais, l'optimisation du dosage en liant a été menée pour acquérir les caractéristiques mécaniques souhaitées pour le projet de digue. Elles concernent la stabilité de l'ouvrage et sa pérennité : résistance en compression, cohésion et angle de frottement, perméabilité. Les résultats de ces essais de laboratoire ont été confrontés aux essais de contrôle effectués sur site ce qui a permis de valider la méthodologie mise en place en laboratoire et en chantier.

Mots-clés :

Sédiment, Valorisation, Liant, Propriétés mécaniques, Pompabilité, Noyau de digue, Développement durable.

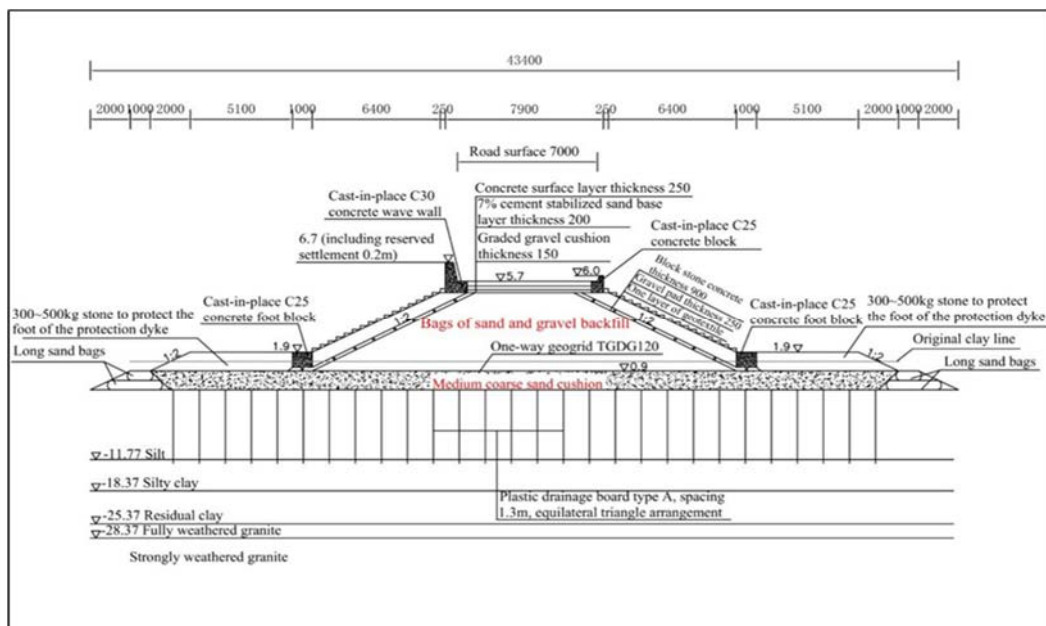
1. Introduction

Depuis une décennie, la Chine a fortement investi dans le développement et la mise en valeur des zones côtières à des fins industrielles stratégiques. Ceci s'est traduit non seulement par des aménagements côtiers mais aussi par des extensions en mer et indirectement par la mise en place de digues de protection et d'enclôture puis de remblais afin de gagner des terrains sur la mer. Ces digues quel qu'en soit le concept, sont de grandes dimensions de longueur kilométrique, elles nécessitent pour leur construction de grands volumes de matériaux. Devant le très grand nombre actuel de projets de construction de digues en Chine et une politique de protection de l'environnement plus stricte, la disponibilité de matériaux traditionnels pose problème. Pour un projet côtier comme une digue, il devient opportun pour pallier cette raréfaction de matériaux de développer des matériaux nouveaux. La ressource renouvelable à proximité des ouvrages côtiers est naturellement relative aux sédiments. Un sédiment stabilisé ou solidifié aux propriétés mécaniques maîtrisées peut se substituer aux matériaux de remplissage pour constituer un corps ou noyau de digue. Ce sédiment doit être fluide après un mélange avec des liants pour être pompé et adapté au remplissage de sacs en géotextile pouvant constituer le noyau d'une digue. Cette phase de préparation et de construction doit être entièrement automatisée. Au-delà de cette phase, le sédiment se solidifie et doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la stabilité du noyau (PU *et al.*, 2019) et garantir une durée de vie suffisante de la digue. La mise au point d'un sédiment solidifié pour constituer un corps de digue en sacs de géotextile a été proposée dans le cas d'un projet de construction d'une partie de la digue sur 200m sur l'île de Zhujiang (Chine), dénommé *digue de Xiapu* (WANG, 2019). Tout d'abord, une étude de la fluidité du mélange sédiment-liant a été menée pour cerner les paramètres de consistance et de prise à l'aide d'essais d'affaissement et de la mesure du temps de prise en fonction du dosage en liant, de la teneur en eau, de la température. S'en est suivie une deuxième étude sur le sédiment solidifié pour déterminer le dosage en liant optimal pour satisfaire les caractéristiques mécaniques à 28 jours, à savoir une résistance à la compression non confinée, une cohésion, un angle de frottement et une perméabilité répondant aux exigences demandées au niveau du projet de la digue de Xiapu. Des essais de contrôle ont eu lieu pendant la construction (état frais du mélange) et après la construction de la digue (état durci), ceux-ci ont permis de valider à la fois la technologie développée pour la préparation et la mise en place des mélanges de sédiments sur le chantier et la méthodologie menée en laboratoire à propos des essais retenus. Le projet de la digue de Xiapu est d'abord présenté au niveau du concept de la digue et les conditions environnantes, puis les résultats des essais entrepris sur les mélanges sédiment-liant à l'état frais et à l'état solidifié sont discutés en fonction des valeurs exigées au niveau du projet. Un organigramme du processus de construction de la digue est finalement établi.

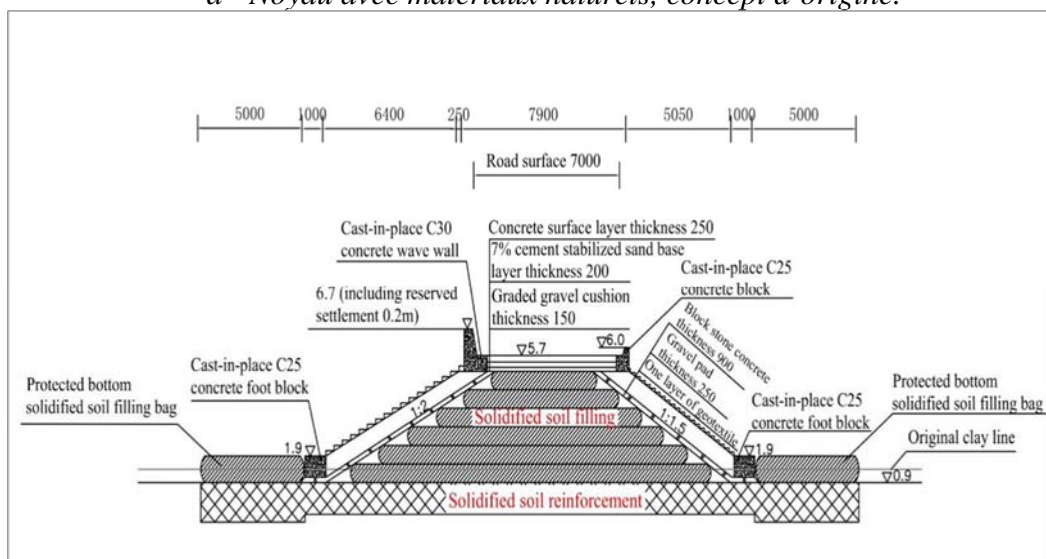
2. Le projet de digue de Xiapu

2.1 Deux corps de digue : avec ou sans apport de matériaux traditionnels ?

Le projet de digue fait partie de la construction d'un second port protégé de l'île de Zhujiang dans la ville de Shajiang (district de Xiapu, province du Fujian). La structure hydraulique principale est une digue d'environ 2 km, d'une hauteur de 5.5 m et largeur maximale de 7.9 m. Dans le projet à l'origine, le corps de digue était à base de matériaux naturels classiques (figure 1a). Il a été modifié par la suite pour minimiser l'apport de matériaux et valoriser les sédiments de proximité en tant que matériaux (figure 1b).



a - Noyau avec matériaux naturels, concept d'origine.



b - Noyau en sacs en géotextile remplis de sédiments solidifiés, concept modifié.

Figure 1. Coupes de la digue de Xiapu.

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

2.2 Géologie et caractéristiques géotechniques du site

Une série de 6 forages a permis de reconnaître les couches principales de sol le long de la digue projetée. En surface, une couche de vase limoneuse épaisse d'environ 12 m surplombe une couche d'argile limoneuse et d'argile se situant entre -12 m et -25 m. Ces couches se positionnent sur un granite plus ou moins altéré. Les propriétés physiques et mécaniques sont pour une part rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1. Données géotechniques des couches de sol le long du projet de digue.

Couche de sol	Profondeur (m)	w (%)	ρ (g/cm ³)	e_0	W_L (%)	W_P (%)	IL	IP	E_M (MPa)	c (kPa)	ϕ (°)
Silt de surface	0-12	59.23	1.60	1.64	53.39	31.06	1.25	22.33	1.80	10.53	7.20
Argile limoneuse	12-20	21.69	1.95	0.68	31.09	18.14	0.27	12.95	5.61	27.87	21.25
Argile résiduelle	20-25	24.43	1.87	0.78	32.17	20.77	0.32	11.40	5.18	18.68	18.81

Note : W teneur en eau, ρ masse volumique humide, e_0 indices des vides naturel, W_L limite de liquidité, W_P limite de plasticité, IL indice de liquidité, IP indice de plasticité, E_M module de compressibilité, c cohésion, ϕ angle de frottement interne.

2.3 Caractéristiques exigées pour le sédiment solidifié dans le projet

La modification du projet de digue de Xiapu a imposé un changement de concept (figure 1b) et le sédiment de proximité a été traité pour qu'il soit réutilisé dans la construction de 200m de digue comme matériau en substitution aux matériaux naturels. Il a servi de matériau d'assise ou fondation et il a constitué le matériau du corps de digue par remplissage de sacs de géotextile. Les performances du sédiment traité à l'état frais (pompage et transport) et durci à 28 jours sont données dans le tableau 2.

Tableau 2. Exigences de performance pour le sédiment solidifié pour le corps de digue.

Performance du sédiment solidifié à l'état frais	Affaissement A (mm)	Initial 1 h	$110 \text{ mm} \leq A \leq 150 \text{ mm}$
	Temps de prise (min)	Consistance initiale	≥ 180
		Consistance finale	≤ 600
Propriétés du sédiment solidifié	UCS _{28 jours} (kPa)	-	≥ 120
	Paramètres de cisaillement à 28 jours	c (kPa)	≥ 20
		ϕ (°)	≥ 15
Coefficient de perméabilité verticale k_v (cm/s)	k_v	$< 1.0 \times 10^{-5}$	

Note : UCS résistance en compression simple.

Le sédiment traité est un sédiment prélevé sur le site du projet dans la couche de surface. C'est une argile plutôt limoneuse de consistance plastique à fluide et relativement homogène.

Le liant ou agent de durcissement, référencé H01 est fourni par la société Jiangsu Kun Ze Technologie Co., Ltd. Il s'agit d'un mélange de laitier, de clinker, de cendres volantes et de gypse.

3. Etude de la fluidité du sédiment traité à l'état frais

3.1 Paramètres retenus dans l'étude

Le mélange sédiment-eau-liant doit rester suffisamment fluide pour assurer son transport et mise en place avant durcissement. La fluidité du mélange dépend d'une part de la nature du sédiment, de sa teneur en eau et du dosage en liant mais de facteurs liés au chantier (méthode *i.e.* avec ou sans agitation et durée de stockage, température). Des essais croisés effectués sur le sédiment de surface mais de nature différenciée (argile, argile limoneuse, limon) ont montré que l'importance des facteurs influençant l'affaissement initial, sont dans l'ordre la teneur en eau du mélange (w variant de 100 à 140%), la nature du sédiment (3 types) et le dosage en liant (80 à 120kg/m³), (WANG, 2019).

3.2 Effets de la teneur en eau du mélange des sédiments sur la fluidité

La fluidité ou consistance du mélange sédiment-eau-liant a été évaluée à partir de la mesure de l'affaissement au cône (facilité d'utilisation en chantier). Il a été montré que la teneur en eau fait augmenter l'affaissement mais différemment selon le temps écoulé depuis le temps initial t_0 . Un exemple d'évolution est donné sur la figure 2, sur laquelle on observe deux comportements avant et après 150% de teneur en eau pour un mélange dosé à 100kg/m³. Selon les exigences du projet, un affaissement A doit être compris entre 110 mm et 150 mm (tableau 2), ce qui entraîne que la teneur en eau du mélange à l'état frais doit être comprise entre 120 et 150%.

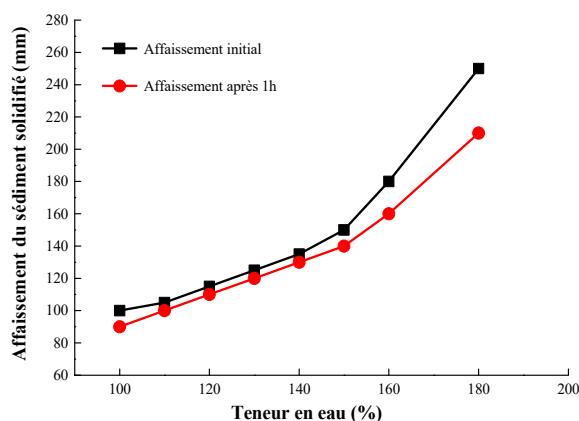


Figure 2. Effet de la teneur en eau sur l'affaissement du sédiment traité.

3.3 Influence de la méthode et durée de stockage et de la température

L'affaissement *i.e.* la consistance du mélange dépend du mode de stockage, de sa durée et de la température au moment de la préparation, du transport et de la mise en place. On peut observer ces influences pour le sédiment traité à 150% de teneur en eau et dosé à 100kg/m³ en liant sur les figures 3 pour 2 modes de stockage : avec ou sans agitation à 20°C (figure 3a) ; pour des températures variant de 20 à 30°C avec agitation continue

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

(figure 3b) et des teneurs en eau allant de 120 à 150% sous agitation continue (figure 3c). On remarque que la perte d'affaissement dans le temps est d'autant plus marquée sans l'agitation du mélange (figure 3a). Ceci est d'importance dans la préparation du mélange et pendant le processus de pompage en chantier. Une autre observation concerne la perte d'affaissement pour une température supérieure à 30°C (figure 3b). A une température de 20°C, sous agitation continue, au fur et à mesure du temps écoulé depuis t_0 , l'affaissement est réduit quelle que soit la teneur en eau mais au-delà d'une heure, cette réduction est notable (figure 3c).

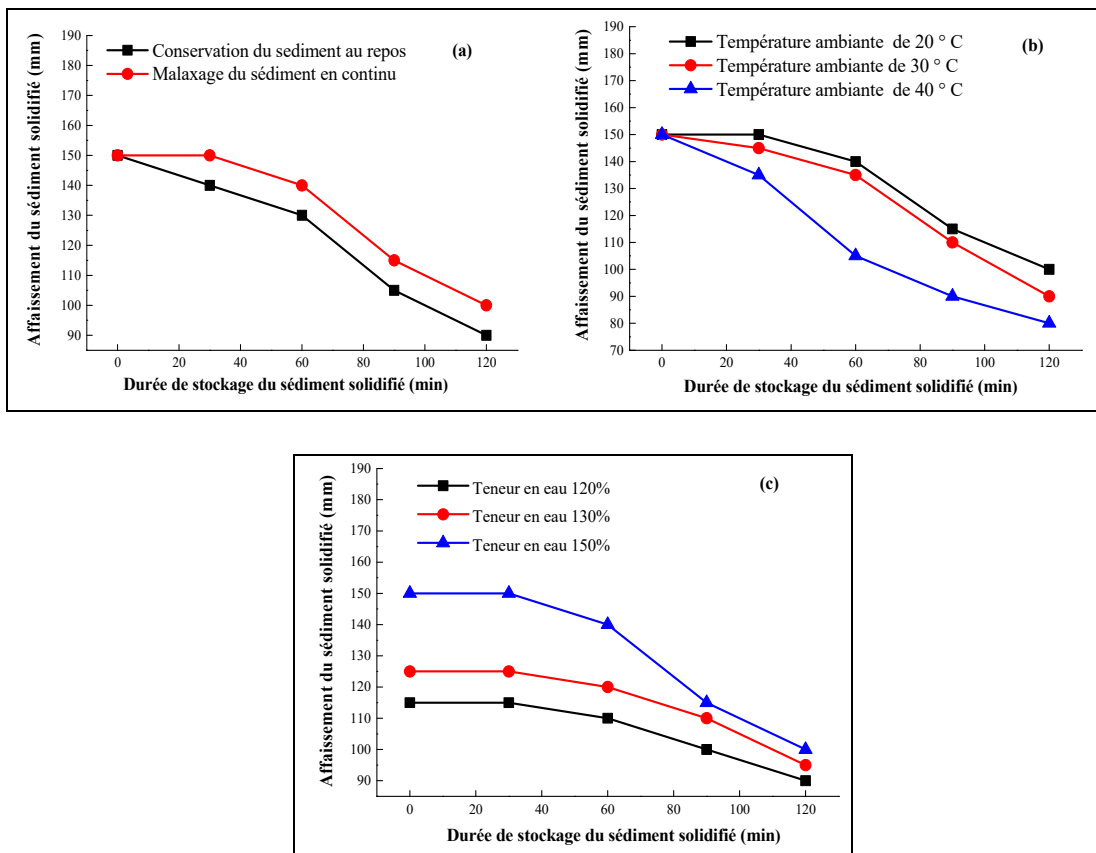


Figure 3. Effets du mode et de la durée de stockage, de la température sur l'affaissement du sédiment traité.

Du point de vue pratique, ces observations ont permis de déterminer que, pour que la fluidité du sédiment soit conforme aux exigences de la construction dans le cas de la digue de Xiapu, la température en chantier ne devrait pas dépasser 30 °C et que le sédiment traité devrait être préparé et stocké avec une agitation continue. La teneur en eau du mélange à respecter serait d'environ 120% à 150% et le temps de mise en place du sédiment traité se situe à 1,5 heure.

4. Etude du sédiment traité à l'état durci à 28 jours

4.1 Paramètres retenus dans l'étude de laboratoire

L'état durci du mélange sédiment-eau-liant a été étudié en laboratoire et les essais à 28 jours ont porté sur les mesures de résistance mécanique comme la résistance en compression simple (UCS), la cohésion c , l'angle de frottement interne φ et la mesure de la perméabilité verticale k . Ces paramètres ont été évalués en fonction de la teneur en eau et du dosage en liant comme indiqué dans le tableau 3. Il s'avère que ces résultats pour un dosage de 100kg/m^3 et une teneur en eau entre 130 et 140% satisfont les exigences de conception demandées.

Tableau 3. Caractéristiques hydromécaniques du sédiment solidifié en laboratoire.

W (%)	Dosage en liant (kg/m^3)	Propriétés du sédiment solidifié à 28 jours			
		UCS (kPa)	c (kPa)	φ (°)	k_v (cm/s)
120	80	179	29.4	23.2	5.7×10^{-6}
	100	206	31.6	25.2	5.8×10^{-6}
	120	312	40.3	27.1	6.0×10^{-6}
130	80	139	25.3	22.5	6.1×10^{-6}
	100	193	29.2	25.1	6.4×10^{-6}
	120	242	32.4	26.2	6.2×10^{-6}
140	80	123	24.0	22.4	6.8×10^{-6}
	100	169	28.7	24.7	7.2×10^{-6}
	120	201	30.2	25.6	7.9×10^{-6}
150	80	109	18.2	19.1	8.8×10^{-6}
	100	131	19.1	20.2	9.2×10^{-6}
	120	162	21.2	20.5	2.1×10^{-5}


4.2 Paramètres mesurés sur site

A l'achèvement de la digue de Xiapu, à la date standard de 28 jours, les essais d'acceptation géotechnique pour le sédiment solidifié du corps de la digue ont été effectués par un bureau de contrôle extérieur. Pour ces essais de contrôle, le corps de la digue a été divisé en 6 couches de bas (couche 1) en haut (couche 6) pour construire le noyau, voir figure 2b. Le sédiment solidifié est prélevé dans chaque couche (voir photo du tableau 3) et soumis à aux essais d'acceptation du site dont les résultats sont récapitulés dans le tableau 3. Pour l'ensemble des essais de contrôle de tous les échantillons prélevés sur l'ouvrage réalisé, il a été observé que la cohésion, l'angle de frottement, le coefficient de perméabilité verticale et la résistance à la compression non confinée dans chaque couche de sédiment solidifié satisfont aux exigences de conception confirmant la qualité de la construction du noyau en sédiments solidifiés.

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

Tableau 4. Caractéristiques hydromécaniques du sédiment solifié sur site.

N° de la couche dans le corps de la digue	Paramètres de cisaillement		k_v (cm/s)	UCS (kPa)
	c (kPa)	ϕ (°)		
Couche n: 1	24.2	21.5	2.25×10^{-6}	120
Couche n: 2	26.7	23.6	2.09×10^{-6}	130
Couche n: 3	29.2	24.7	1.90×10^{-6}	160
Couche n: 4	30.1	28.1	1.86×10^{-6}	180
Couche n: 5	34.8	29.7	1.75×10^{-6}	200
Couche n: 6	36.5	30.1	1.70×10^{-6}	200
Exigences de conception	≥ 20	≥ 20	$< 1.0 \times 10^{-5}$	≥ 120



Cube de sédiment prélevé sur site

5. Conclusions

Le sédiment *i.e.* argile limoneuse a été mis en œuvre avec une teneur élevée (130 à 140%) mélangé avec un liant spécial dosé à 100kg/m^3 . Ce mélange a été pompé et a rempli les sacs en géotextiles *i.e.* géotubes[®] prévus pour le corps de digue en 6 couches (voir figure 4). Une technologie appropriée a été développée pour réaliser le pompage et un remplissage ($\geq 70\%$). Les exigences de conception ont pu être satisfaites à la suite d'essais spécifiques menés en laboratoire confrontés à des essais de contrôle sur site.



Figure 4. Corps de la digue en cours de réalisation.

6. Références

- PU S.Y., ZHU Z.D., WANG H.R., SONG W.L., WEI R.J. (2019). *Mechanical characteristics and water stability of silt solidified by incorporating lime, lime and cement mixture, and SEU-2 binder*, Construction and Building Materials, Vol. 214, pp 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.103>
- WANG X. (2019). *Méthodologies de valorisation de sédiments mises en œuvre dans des ouvrages géotechniques en Chine*. Thèse de doctorat, U. de Caen Normandie, 202 p.