



HAL
open science

Les sédiments fluviaux de l'Usumacinta du Mexique et leur valorisation

Irini Djeran-Maigre, Daniel Levacher, Andry Razakamanantsoa, Stéphane Vacherie

► To cite this version:

Irini Djeran-Maigre, Daniel Levacher, Andry Razakamanantsoa, Stéphane Vacherie. Les sédiments fluviaux de l'Usumacinta du Mexique et leur valorisation. JNGG 2020, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nov 2020, Lyon, France. 9 p. hal-03033598

HAL Id: hal-03033598

<https://hal.science/hal-03033598>

Submitted on 21 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES SEDIMENTS FLUVIAUX DE L'USUMACINTA DU MEXIQUE ET LEUR VALORISATION

USUMACINTA RIVER SEDIMENTS FROM MEXICO AND THEIR VALORIZATION

Irini DJERAN-MAIGRE¹, Daniel LEVACHER², Andry-Rico RAZAKAMANANTSOA³, Stéphane VACHERIE¹

¹ *Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, 69621 Villeurbanne, France*

² *Université Caen Normandie, M2C, 14000, Caen, France*

³ *Université Gustave Eiffel, Département GERS, 44344 Bouguenais, France*

RÉSUMÉ - Dans le cadre du projet pluridisciplinaire et international, Val-Uses, des sédiments du fleuve Usumacinta du Mexique ont été prélevés et transportés en France. Leur caractérisation approfondie du point de vue minéralogique, physique, chimique, rhéologique et hydromécanique est présentée en associant des mesures microstructurales et macroscopiques. Leur adéquation pour la filière de construction de briques est étudiée en vue de leur valorisation.

ABSTRACT – As part of the multidisciplinary and international project, Val-Uses, sediments from the Usumacinta river in Mexico were collected and transported to France. Their in-depth characterization from the mineralogical, physical, chemical, rheological and hydro-mechanical point of view -combining microstructural and macroscopic measurements-, and their valorization as brick materials for construction are presented and discussed.

1. Introduction

Le projet pluridisciplinaire Val-Uses, financé par l'ANR et son homologue mexicain le Conacyt, propose d'aborder la complexité du bassin versant de l'Usumacinta situé au sud-est du Mexique, en prenant comme objet d'étude ses sédiments. La partie ingénierie du programme, intégrée dans un ensemble environnemental et social, pose la question de la valorisation et de la co-valorisation des sédiments, en lien avec les usages actuels et passés et dans l'intérêt des habitants du bassin. L'objectif est le réemploi des sédiments comme ressource durable alternative et pour cela, il faut analyser les filières potentielles majeures de valorisation des sédiments de l'Usumacinta. Ceci nécessite l'acquisition d'une connaissance approfondie du comportement des sédiments, à des échelles spatiales et temporelles différentes, et des usages anthropiques qui en sont faits. La co-valorisation des sédiments avec des fibres naturelles, permettant de créer des matériaux à forte valeur ajoutée et à très faible impact environnemental, constitue un volet supplémentaire au projet (non traité dans cet article).

Le prélèvement des sédiments, les plus représentatifs du fleuve Usumacinta, et pouvant être valorisés, a constitué une étape cruciale pour le projet. Deux lieux différents, Tenosique et Jonuta, ont été choisis et les prélèvements ont été réalisés sans difficulté majeure grâce à la préparation et coordination en amont. Le volet logistique a été ainsi important et ne concernait pas uniquement le prélèvement mais également le stockage et l'acheminement des sédiments du Mexique en France.

La caractérisation minéralogique, chimique, hydrique, rhéologique et mécanique des sédiments est un préalable à toute recherche visant leur valorisation. Une campagne de caractérisation complète est menée et différentes filières de valorisation sont explorées. Cet article présente les résultats concernant les filières de fabrication de briques. La

valorisation concernant la filière géotechnique avec construction de routes de faible portance, non revêtues et celle concernant la filière des amendements agronomiques, sont en cours de traitement.

2. Prélèvements des sédiments

Le bassin du fleuve Usumacinta est l'un des plus grands bassins de la région méso-américaine situé dans l'état du Tabasco au Mexique (figure 1a) avec une superficie de 112550 km². L'Usumacinta et Grijalva sont les deux plus longs fleuves mexicains de 560 km et 600 km, respectivement (Day et al., 2003). Le débit de l'Usumacinta de 2678 m³/s constitue l'un des débits les plus importants qui n'a pas été affecté par les infrastructures humaines. 52% du bassin se trouve au Guatemala (Usumacinta haut) et le reste au Mexique (Usumacinta bas). En particulier, les sources de l'Usumacinta sont situées dans le massif de la «Sierra de los Cuchumatanes» (Guatemala), ce qui signifie que toutes les activités anthropiques menées au Guatemala et les pollutions qui pourraient en résulter au niveau du cours d'eau affecteraient de fait le comportement et la nature le long du fleuve. Les fleuves Grijalva et Usumacinta se rejoignent à 25 km avant la côte du golfe du Mexique, dans un delta composé de sédiments fluviaux.

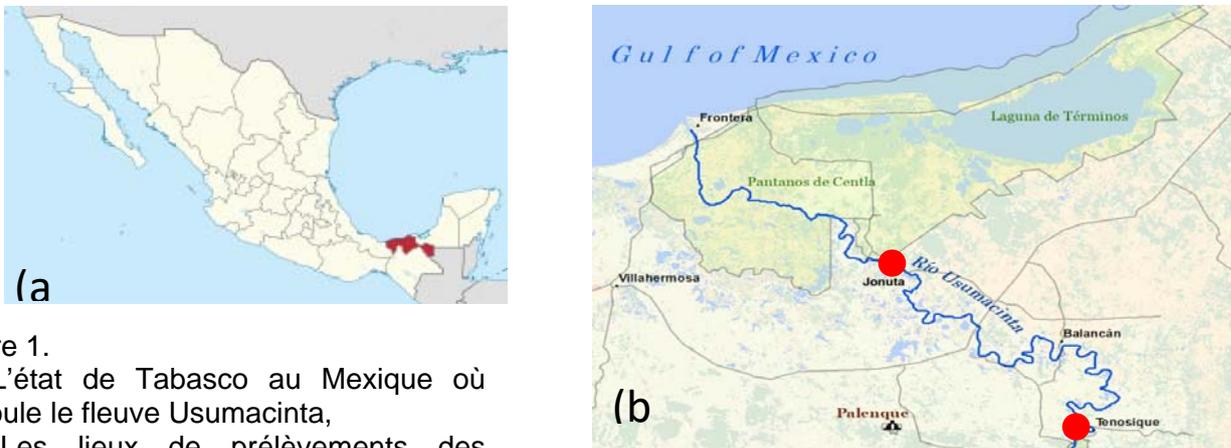


Figure 1.
(a) L'état de Tabasco au Mexique où s'écoule le fleuve Usumacinta,
(b) Les lieux de prélèvements des sédiments : Jonuta et Tenosique.

La toute première étape pour la partie du projet relative à la «caractérisation des sédiments et valorisation», est celle du prélèvement de sédiments les plus représentatifs du fleuve Usumacinta, pouvant avoir un intérêt pour la valorisation. Une organisation a été mise en place pour que les équipes mexicaine et française puissent se coordonner pour assurer les prélèvements et le stockage des sédiments, précédant le transport par voie maritime. Deux lieux différents, Tenosique et Jonuta, villes de l'état de Tabasco, ont été choisis et les prélèvements ont été réalisés à partir de cinq et quatre différents sites par lieu respectivement (figure 1b), grâce à des préleveurs manuels (cônes, pelles, seaux). Les sédiments ont été dénommés par une lettre, T ou J, définissant le lieu de prélèvement et par des chiffres définissant les sites. Cette campagne de prélèvement au volume conséquent de 2400 litres s'est déroulée sans difficulté particulière grâce à la préparation et coordination en amont des équipes mexicaine et française. Un volet logistique important a été mis en place pour assurer et finaliser l'acheminement des sédiments, de l'eau du fleuve et des fibres végétales de Villahermosa à Lyon.

3. Méthodes expérimentales de caractérisation

Afin de caractériser et identifier les sédiments et permettre de juger leur adéquation par rapport aux filières de valorisation visées, une importante campagne expérimentale a été menée et elle est présentée succinctement dans cet article.

3.1. Analyses chimiques

Les analyses chimiques effectuées ont pour but de déterminer le niveau de pollution des sédiments. Les concentrations en pesticides, en hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP et en biphényles polychlorés PCB, ont été mesurées par chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse et chromatographie liquide - spectrométrie de masse, selon les normes NF ISO 22155. Les analyses de métaux lourds sont réalisées selon les normes NF EN ISO 11885 et les valeurs sont comparées au niveau S1. La concentration de nitrates, nitrites, chlorures et sulfates dans l'eau du fleuve est mesurée par spectrophotométrie selon les normes NF ISO 15923-1 et sont comparées aux valeurs seuils des eaux souterraines données par les arrêtés du 17 décembre 2008 (JORF, 2009).

3.2. Paramètres physiques

Afin de classer les sédiments selon le GTR, les limites d'Atterberg, la valeur au bleu (VBS), la taille des grains ainsi que la teneur en eau et le pourcentage de matières organiques des 9 sédiments, ont été mesurées. Les valeurs de CEC ont pu être extraites par les valeurs VBS. La viscosité des sédiments est évaluée à l'aide d'un rhéomètre et montre un caractère rhéofluidifiant. La surface spécifique est déterminée à partir d'un échantillon compacté au moyen de la méthode Brunauer-Emmett-Teller (BET). L'isotherme d'adsorption est mesurée avec la méthode Barrett-Joyner-Halenda (BJH). De l'isotherme d'adsorption, la distribution de la taille des pores et le volume d'azote absorbé peuvent être déduits. L'analyse des oxydes est réalisée par microfluorescence X et l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X.

4. Résultats et corrélations

Les résultats de caractérisation sont donnés du point de vue géotechnique, de la microstructure et de la pollution. Ces résultats permettent également de se positionner par rapport aux exigences particulières des filières de valorisation.

4.1. Caractérisation géotechnique

Selon le GTR, les mesures effectuées permettent de classer les sédiments T5, J1 et J3 comme A2 (sables argileux fins, limons, argiles et marnes à faible plasticité) et les autres sédiments comme A1 (limon à faible plasticité, loess, limon alluvial, sable fin faiblement pollué, sable faiblement plastique). Tous les échantillons contiennent de l'argile en proportions inférieures à 15%. Le pourcentage de sable fin peut atteindre 65% et le limon varie entre 40 et 84%. Le niveau de matière organique reste en deçà des 6% (tableau 1).

Tableau 1 : Propriétés géotechniques, physiques et organiques

sédiment	matières	carbonate	VBS	limites d'Atterberg			classification GTR
	organiques	CaCO ₃		wL	wp	IP	
	%	%		%	%		
T1	4,7	9,4	2,3	39,0	31,0	8,0	A1
T2	3,5	5,2	1,8	33,0	22,9	10,2	A1
T3	5,0	0,9	3,1	49,0	36,7	12,7	A1
T5	3,6	(-)	5,7	45,1	27,5	17,7	A2
T6	3,5	7,3	2,7	55,0	(-)	(-)	A1
J1	4,5	8,4	4,6	56,5	33,0	23,5	A2
J3	5,1	7,8	3,4	51,5	30,3	21,2	A2
J4	6,0	4,5	7,7	62,0	43,9	18,1	A1
J5	4,9	7,2	4,2	49,6	33,8	15,9	A1

4.2. Potentiel de pollution

Les résultats de concentration de différents polluants sont nettement inférieurs au niveau S1 (tableau 2). Seule la concentration du nickel présente un taux plus élevé que le seuil admis, de deux à cinq fois. Ce niveau élevé pourrait être relié à la présence de mines de nickel au Guatemala. Quant aux valeurs des PCB, elles sont inférieures aux limites de détection des instruments, tout comme celles des composés volatils, des chlorophénols, des glyphosates et des nitrates. Les concentrations de HAP sont inférieures à 0,5% du niveau requis. Les concentrations de nitrites dans l'eau se situent à 30% du niveau requis pour Jonuta et sont inférieures aux limites de détection pour Tenosique (tableau 2). Ces résultats démontrent que les sédiments ne sont pas pollués et que leur valorisation est envisageable.

Tableau 2. Teneurs en métaux lourds et en polluants des sédiments de Tenosique et de Jonuta

Métaux lourds polluants	Unité (par masse sèche)	Niveau S1	T1	T2	T3	T5	T6	J1	J3	J4	J5
Arsenic (As)	mg/kg	30	2,73	2,31	1,79	3,02	2,75	2,81	2,71	5,19	2,18
Cadmium (Cd)	mg/kg.	2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,44	<0,4	<0,4	<0,4
Chrome (Cr)	mg/kg	150	108	76,1	23	98,6	96,3	103	99,8	131	96,5
Cuivre (Cu)	mg/kg	100	17,2	10,8	11,4	15,4	14,5	18,3	15,8	20,5	15,8
Mercure (Hg)	mg/kg	1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Nickel (Ni)	mg/kg.	50	164	107	44,5	147	141	168	157	256	161
Plomb (Pb)	mg/kg	100	9,49	6,53	8,18	9,97	7,78	16,5	9,2	11,3	8,68
Zinc (Zn)	mg/kg	300	46,6	36,8	42,7	42,4	40,8	71,4	45,9	40,2	43,8
PCB totaux	mg/kg	0,68	<0,00 1								
HAP totaux	mg/kg	22,8	0,11	0,012	0,2	0,049	0,025	0,071	0,12	0,014	0,031

4.3. Propriétés microstructurales

Les méthodes BET et BJH permettent d'accéder à la surface spécifique, à la distribution des pores et à l'arrangement granulaire des sédiments à l'aide des isothermes d'adsorption. Toutes les courbes d'isothermes d'adsorption présentent la même allure. Les volumes d'azote (N₂) adsorbés par les sédiments T5 et T3 sont deux à trois fois plus élevés que pour les trois autres sédiments de Tenosique (figure 2). Toutes les isothermes développent une hystérésis, dont la hauteur traduit l'affinité du matériau pour l'eau. Les échantillons montrant la plus grande hystérésis présentent également la plus grande surface spécifique. Ces sédiments seront les plus faciles à humidifier mais aussi les plus difficiles à sécher.

Parmi tous les sédiments, c'est le sédiment J4 qui présente l'affinité pour l'eau la plus élevée. Sa valeur d'hystérésis est d'environ 1,6 fois la moyenne et sa surface spécifique est presque deux fois plus grande que la moyenne. Les surfaces spécifiques BET des sédiments (SSA par N₂), sont comprises entre 20 et 30 m²/g, à l'exception des sédiments T5 et J4 qui se distinguent, avec des surfaces spécifiques de 36,2 m²/g et de 54,5 m²/g respectivement (tableau 3).

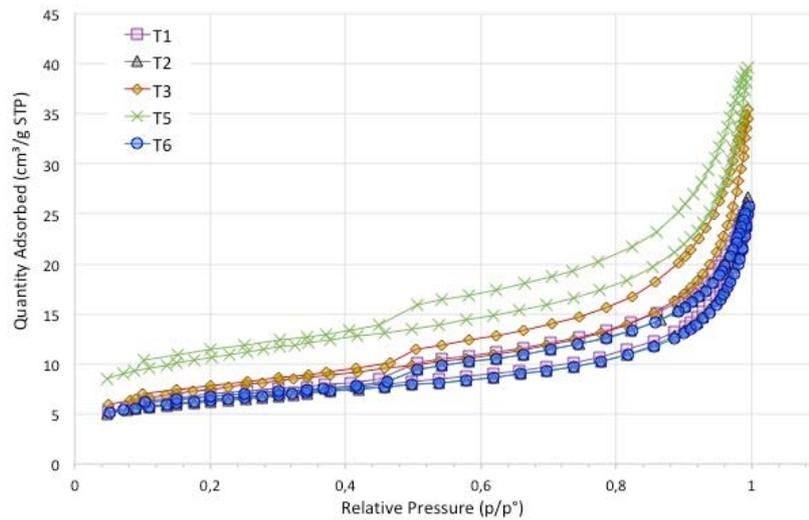


Figure 2. Isothermes d'adsorption des sédiments prélevés à Tenosique.

4.4. Corrélations entre paramètres physiques, géotechniques et chimiques

Il est également possible de déterminer les valeurs de surface spécifique à partir des valeurs au bleu VBS (SSA par VBS) à l'aide de la formule proposée par Santamarina et al. (2002). Ces valeurs sont comprises entre 44 et 189 m²/g (tableau 3). Le sédiment T2 présente la valeur la plus faible et le sédiment J4 la plus élevée. Le sédiment T5 est le seul sédiment de Tenosique ayant une valeur SSA supérieure à 100 (141 m²/g) et une plus grande affinité pour l'eau. On peut ainsi s'affranchir des mesures de surface spécifique par la méthode BET et l'adsorption d'azote qui demandent l'utilisation d'un équipement spécifique. Les valeurs de SSA par VBS sont supérieures à celles obtenues par la méthode BET. En effet, ces dernières sont mesurées sur des blocs de matériaux où certaines surfaces sont inaccessibles alors que les mesures au bleu de méthylène sont effectuées sur des matériaux en suspension.

La capacité d'échange cationique des échantillons de sédiments a été calculée à l'aide de l'équation de Cokca et Birand (1993). Les CEC obtenues sont comprises entre 6 et 24 meq/100g d'argile. Seul l'échantillon J4 a une valeur de CEC supérieure à 20 (24 meq/100g d'argile). Elles sont inférieures à 10 pour les sédiments T1, T2 et T6 et restent comprises entre 10 et 20 meq/100g d'argile pour les autres échantillons (tableau 3).

Tableau 3. Hystérésis des isothermes d'adsorption, surfaces spécifiques, absorption de sodium et échange cationique des sédiments de l'Usumacinta

Sédiment	Hauteur d'hystérésis cm ³ /g STP	SSA par N ₂ m ² /g	SSA par VBS m ² /g	SAR g	CEC par VBS meq/100g d'argile
T1	2.26	21,9	57	0,673	7
T2	1.93	21,14	44	0,606	6
T3	1.99	25,8	77	8,303	10
T5	2.75	36,2	141	0,727	18
T6	1.94	21,3	63	0,711	8
J1	2.25	26,9	112	0,930	14
J3	2.73	28,2	85	0,698	11
J4	3.98	54,5	189	1,243	24
J5	2.36	26,7	104	0,893	13

Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) est obtenu à partir des concentrations d'ions (Na⁺), de calcium (Ca²⁺) et de magnésium (Mg²⁺), pour chaque sédiment et pour les eaux

des deux sites. Les valeurs de concentration sont données à partir de l'analyse chimique. Les échantillons présentent des valeurs SAR entre 0,6 et 1,3 sauf pour le sédiment T3 qui a une valeur SAR 10 fois plus élevée que les autres (8,303). Cependant, elle reste inférieure à 26, considérée comme «faible en sodium» selon Burger et Celkova (2003), valeur qui limite les risques d'alcalinisation et de dispersion des sédiments, et qui les rend moins sensibles à l'eau et à la floculation (Kumar, 2004). Ces caractéristiques constituent un avantage pour leur valorisation. Une relation linéaire relie les valeurs SAR et de CEC. On observe que l'échantillon T3 se situe très loin des autres, ce qui s'explique par sa faible valeur en Ca, ses pores, de très faible taille inférieure à 25 Å et son très faible pourcentage de sable.

La figure 3 présente les viscosités mesurées sur les sédiments de Tenosique, à la limite de liquidité, en fonction du taux de cisaillement. Les sédiments forment deux groupes cohérents T1-T2 et T3-T5. Ces deux groupes se différencient au niveau des valeurs au bleu (tableau 1) et présentent donc des différences d'argilosité et d'affinité pour l'eau. Pour les sédiments T3-T5 la présence d'eau agit comme un lubrifiant et diminue la viscosité. La hiérarchie des valeurs de viscosité peut être expliquée par la teneur en carbonates. Les taux en carbonates plus élevés rendent les sédiments plus résistants augmentant ainsi leur viscosité, Le sédiment T1 qui a le taux de carbonate le plus élevé (9.4%) exhibe la viscosité la plus élevée.

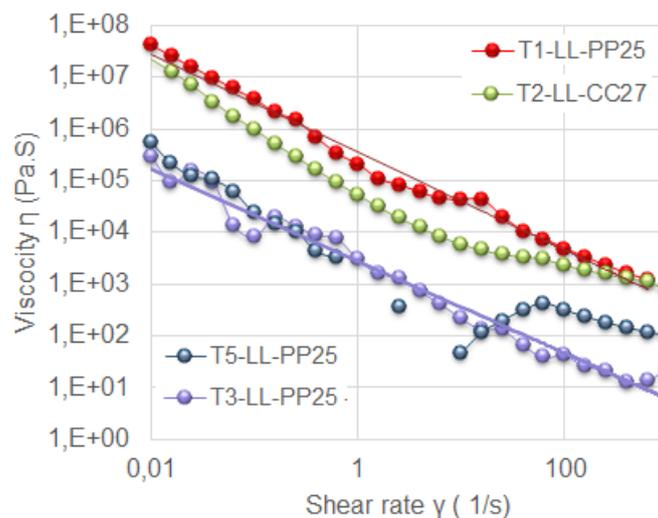


Figure 3. Viscosité en fonction du taux de cisaillement pour les sédiments de Tenosique.

5. Valorisation des sédiments dans la filière de fabrication de briques

La première filière de valorisation pour les sédiments de l'Usumacinta à être explorée est la filière de fabrication des terres cuites, à savoir briques, tuiles et céramiques. Nous disposons de diagrammes qui renseignent sur l'adéquation optimale ou acceptable des sédiments étudiés sur la possibilité de cette valorisation. Les limites d'Atterberg peuvent être tracées sur le diagramme de Casagrande dans le plan de l'indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité et également dans le plan de la limite de plasticité et de l'indice de plasticité. Le diagramme de Casagrande (Gippini, 1969) de la figure 4, définit les zones pour l'extrusion. Les échantillons situés dans les zones A et B, ont des caractéristiques optimales et adéquates pour l'extrusion, respectivement. Le graphique d'ouvrabilité de Bain et Highley (1979) de la figure 5, définit deux zones d'ouvrabilité concernant la fabrication de briques et de poteries : l'ouvrabilité est optimale pour le rectangle C et bonne pour le rectangle D (da Fonseca et al., 2013).

Les échantillons T1 et T5 sont situés à l'intérieur de la zone D et semblent convenir à la production de briques et de poteries. Ces mêmes échantillons T1 et T5 sont situés à l'intérieur du cadre A de la figure 4 offrant des caractéristiques optimales pour l'extrusion.

Sur cette figure 4, l'échantillon T3 est proche du cadre A mais reste en dehors de la zone d'ouvrabilité tout comme le sédiment T2 (figure 5). Ces 2 échantillons ne conviennent pas à la production de briques et céramiques.

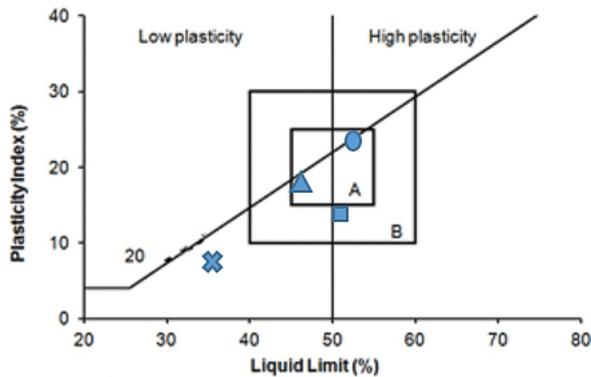


Figure 4. Diagramme de Casagrande avec les domaines relatifs à l'extrusion de matériaux, échantillons de Tenosique (Gippini, 1969).

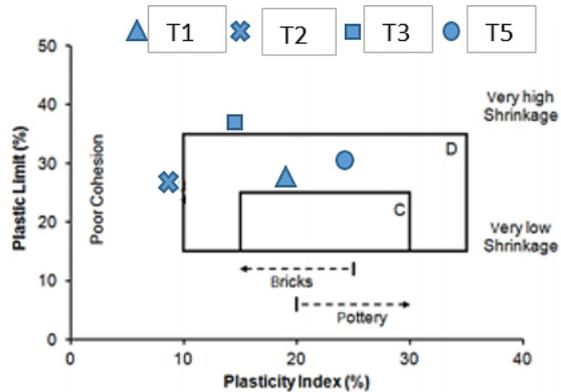


Figure 5. Diagramme de maniabilité de l'argile, échantillons de Tenosique (Bain et Highley, 1979)

Les sédiments de Jonuta dans ces mêmes diagrammes d'extrusion (figure 6) et d'ouvrabilité (figure 7) se situent en dehors des zones D et C pour leur ouvrabilité et même si certains d'entre eux sont proches du cadre A ou à l'intérieur (J5), ils conviennent d'une manière limitée à la production de briques et de céramiques.

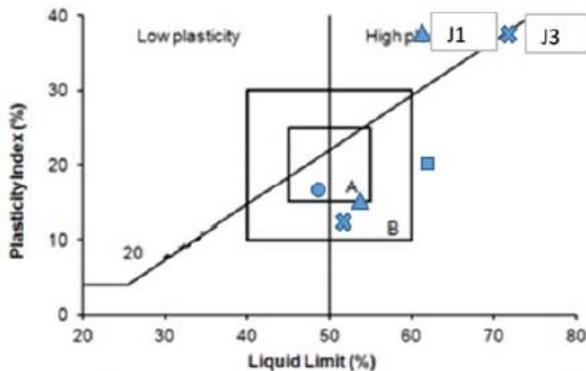


Figure 6. Diagramme de Casagrande avec les domaines relatifs à l'extrusion de matériaux, échantillons de Jonuta (Gippini, 1969).

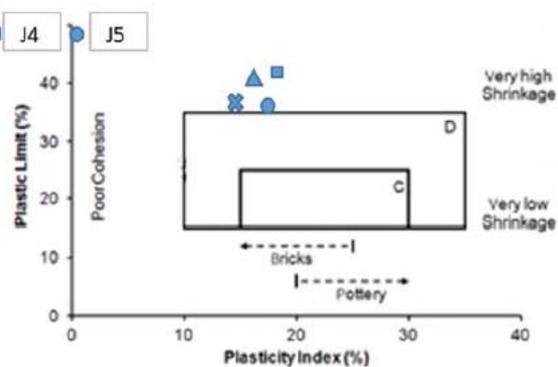


Figure 7. Diagramme de maniabilité de l'argile, échantillons de Jonuta (Bain et Highley, 1979).

6. Conclusions

Le bassin du fleuve Usumacinta, situé dans une zone tropicale, est exposé aux aléas engendrés par les changements climatiques et les activités humaines avec leurs impacts anthropiques. Une composante essentielle de cet écosystème : *les sédiments fluviaux*, est moins étudiée et donc mal connue. Le but de cette étude est, après avoir caractérisé de manière approfondie ces sédiments fluviaux, de proposer une gestion de ces sédiments respectueuse de l'environnement, en utilisant des techniques de valorisation innovantes en fonction des conditions locales. Pour cette étude, de grandes quantités de sédiments ont été nécessaires pour effectuer tous les essais requis. L'une des missions importantes et obligatoires a été la sélection des sites de prélèvement, suivie par les efforts importants déployés, de l'échantillonnage, de l'extraction, du stockage et enfin du transport des sédiments du Mexique vers la France.

Les résultats expérimentaux ont permis de caractériser du point de vue physique, chimique, rhéologique et hydromécanique les sédiments de l'Usumacinta. A partir de ces résultats, une connaissance approfondie de leur comportement à travers leur classification a été établie. Les premiers résultats obtenus sont donnés par les analyses macroscopiques qui déterminent la maniabilité des sédiments. Quant à l'analyse microstructurale, elle est utilisée pour compléter le panel des propriétés des sédiments dont la surface spécifique disponible pour les interactions hydriques ou physico-chimiques, les isothermes d'adsorption caractérisant l'affinité pour l'eau des sédiments. Après cette caractérisation approfondie, des corrélations entre paramètres sont proposées et validées. Le comportement rhéologique et l'évolution des isothermes d'adsorption ont pu être reliés grâce la minéralogie. Les minéraux argileux pilotent l'affinité pour l'eau ; quand l'affinité pour l'eau est importante, la viscosité diminue tout en ayant l'hystérésis des isothermes qui augmente. La résistance au cisaillement augmente avec le taux de carbonates, ainsi un taux de carbonates élevé donne de plus fortes valeurs de viscosité et une augmentation de volume d'azote adsorbé. Les caractéristiques des sédiments doivent être analysées au regard des exigences des champs de valorisation possibles. Trois domaines de valorisation sont choisis. Les impératifs concernant le domaine de la fabrication de terres cuites sont présentés. L'adéquation des sédiments avec cette filière est reliée aux capacités d'extrusion et à leur maniabilité. Deux échantillons exhibent un comportement optimal (T1 et T5). Ces travaux seront poursuivis pour mieux comprendre le comportement des sédiments et investiguer les besoins d'autres champs de valorisation retenus : le génie routier et terrassement et la fertilisation agronomique par épandage de sédiments. Ceci permettra de pouvoir analyser les enjeux majeurs des usages bénéfiques des sédiments dragués de l'Usumacinta.

Remerciements

Cette étude est financée par l'ANR PRI (Fr) – CONACYT (Mx) n° ANR-17-CE03-0012-02. Les auteurs remercient O. Sediki de l'Université G. Eiffel, l'élève-ingénieur O. Linares de l'INSA Lyon et les étudiants de Master R. Delnegro et M. Hussain des Universités de Nantes et de Caen respectivement.

7. Références bibliographiques

- Bain J.A., Highley D.E. (1979). Regional appraisal of clay resources – A challenge to the clay mineralogist. *Developments in Sedimentology*. vol.27, pp. 437-446.
- Burger F., Celkova A. (2003). Salinity and sodicity hazard in water flow processes in the soil. *Plant Soil and Environment*, vol. 49, n°7, pp. 314-320.
- Cokca E., Birand A. (1993). Determination of cation exchange capacity of clayey soils by the methylene blue test. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 16, issue 4, pp. 518-524.
- da Fonseca B.S., Galhano C., Vilão A. (2013). Utilization of Estremoz marbles sawing sludge in ceramic industry – Preliminary approach. *Civil and Environmental Research*, vol.3, n°9, pp. 68-74.
- Day J.W., Arancibia A.Y., Mitsch W.J., Lara-Dominguez A.L., Day J.N., Ko J.Y., Lane R., Lindsey J., Zarate-Lomeli D. (2003). Using ecotechnology to address water quality and wetland habitat loss problems in Mississippi basin (and Grijalva/Usumacinta basin), a hierarchical approach. *Biotechnology Advances*, vol. 22, pp. 135-159.
- Gippini E. (1969). Contribution à l'étude des propriétés de moulage des argiles et des mélanges optimaux. *L'industrie céramique*, n°619, pp 423-435.
- JORF (2009). Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines.
- Kumar A. (2004). Irrigation water quality in district Dehradun, Uttranchal, *Water Pollution*, chapitre 30, Published by APH Publishing Corporation.

Santamarina J.C., Klein K.A., Wang Y.H., Prencke E. (2002). Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 39, n°1, pp. 233-241.