



Barrages



Energie



Eau
Environnement



Infrastructures
et aménagements
hydrauliques



Calcul
scientifique

DigueELITE

Un programme de recherche ambitieux

Séminaire ASYBA-AREAS-CEREMA
19/03/2014

Nicolas NERINCX

ISL
Ingénierie



Barrages

Sommaire

1/ Problématique

2/ Contexte

3/ Les données du projet

4/ Objectifs

5/ Produits

6/ Axes de travail

7/ Etat d'avancement

8/ Prochaines étapes



Energie



Eau
Environnement



Infrastructures
et aménagements
hydrauliques



Calcul
scientifique

Ouvrages hydrauliques

Les digues protègent mais peuvent rompre

- 8000 km de digues fluviales en France
- 17 millions de résidents et 9 millions d'emplois exposés au risque d'inondation par débordement de cours d'eau
- 90 % des ruptures dues à l'érosion
 - Pour moitié, érosion interne
 - Pour moitié, érosion externe
- Grande hétérogénéité des matériaux, contextes, entretien, ancienneté, gestion, enjeux, ... des ouvrages fluviaux
- 3 à 5 000 km de digues ont besoin de travaux, soit 200 km/an sur 15 à 25 ans
- Sans compter les ouvrages de ralentissement dynamique, les ouvrages fluviaux, les ouvrages de retenue,...



⇒ **Il existe un réel besoin de solutions pour améliorer la résistance des digues de protection, existantes ou en projet**



Les données du projet

Partenaires : 2 PME, 2 groupes industriels et un laboratoire de recherche



Durée : 36 mois depuis juin 2013

Pôles de compétitivité associés :

- Pôle Risques (PACA)
- Pôle Axelera (Rhône Alpes)





Le sol traité, la base du matériau CONDYMAT

- ↪ Innovations dans la méthodologie de traitement
- ↪ Innovations dans la composition du mélange du liant

⇒ Nouveau matériau CONDYMAT

⇒ Caractéristiques mécaniques, de résistance à l'érosion externe ou interne inégalées par des matériaux de remblais traditionnels

⇒ CONDYMAT est le point de départ d'une innovation ambitieuse dans le domaine des digues de protection : la DigueELITE





Objectifs

Les caractéristiques attendues du matériau CONDYMAT permettent d'envisager un ouvrage DigueELITE aux propriétés suivantes

- Facilité de **mise en œuvre**
- **Résistance à l'érosion** interne et externe
- Optimisation de la **stabilité** du remblai
- **Résistance à la surverse** (évacuation des crues et augmentation de la sûreté de l'ouvrage)
- **Faible perméabilité**

⇒ **Ouvrages neufs**

⇒ **Confortements**



Produits





Axes de travail

La DigueELITE repose sur les innovations et avancements suivants :

- **Matériaux :**
 - Permettre l'utilisation de **matériaux locaux** de médiocre qualité, ou l'utilisation de **sédiments**
- **Conception :**
 - Concevoir des **zones résistantes à la surverse** (sûreté de l'ouvrage) et de **zones déversantes** (contrôle des crues)
- **Sûreté et développement durable**
 - **Réduire le coût global** de construction et de maintenance
 - Ne pas rompre la continuité **esthétique, paysagère et écologique**
 - **Améliorer la résistance** des digues fluviales de protection, anciennes, ou neuves en réduisant l'aléa de rupture (érosion, glissement)



Validation

Développer une méthode de quantification de la résistance à la surverse d'une digue en matériau CONDYMAT



La sûreté et développement durable

- **Respect des obligations réglementaires :**

La construction d'une nouvelle digue ou déversoir ainsi que le confortement d'un ouvrage existant basé sur le concept DigueELITE :

- Doivent rencontrer les objectifs de développement durable, tout en gardant la maîtrise des risques associés
- Un projet de ce type est soumis à des obligations réglementaires, notamment en termes de sécurité et d'environnement

- **Solution innovante :**

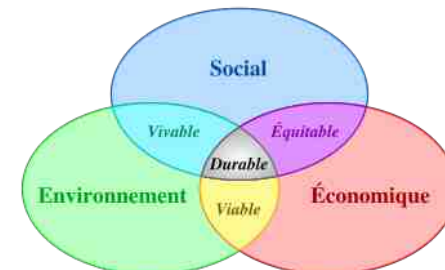
Le caractère innovant d'une solution DigueELITE requiert une analyse globale des risques relatifs à :

- La sécurité des ouvrages
- Le concept développement durable
- Le risque financier



La sûreté et développement durable

- Déployer/adapter les méthodes **d'analyse des risques** basées sur la Sûreté de Fonctionnement et la Fiabilité des structures dans le cadre des Etudes de dangers
- Optimiser l'intégration de l'ouvrage dans son **environnement**
 - Continuité écologique
 - Aspects paysagers
 - Traiter dès le stade de définition de la DigueELITE les aspects associés aux études d'impact
 - Réutilisation des sédiments
- Etudier le **risque financier**
 - La solution innovante doit rester intéressante financièrement





Matériau

Il n'existe pas d'ouvrage exploitant de façon optimale le potentiel du matériau sol chaux dans les ouvrages hydrauliques, encore moins dans les digues fluviales

⇒ **Il faut donc formuler les matériaux CONDYMAT et leur domaines d'emploi pour les digues de protection**

Principes d'élaboration des matériaux sol-chaux en ouvrage hydraulique :

- Préparés avec des technologies et équipements modernes et dédiés
- Mis en place selon une méthodologie spécifique
- Rencontrent les objectifs d'homogénéité, de résistance à l'érosion, de perméabilité...

Les tâches sont :

- Extension du concept du traitement aux sols insuffisamment argileux → **CONDYMAT SOL**
- Maîtrise de la rigidité mécanique (modules d'élasticité), compatibilité avec les fondations ou ouvrages supports
- Compatibilité et synergie avec les géosynthétiques
- Etude des spécificités des ouvrages maritimes : contact avec l'eau de mer (SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+}) → **CONDYMAT MAR**
- Aspects spécifiques à la réutilisation et valorisation des sédiments → **CONDYMAT SED**



Matériau

Identification des matériaux des sites

- Reconnaissances et campagnes de prélèvement (principes : GTR & pratiques OH)
- Identification en laboratoire
- Regroupement éventuel par familles

Etudes de traitement

- Détermination des couples sols-chaux (ou liants à base de chaux) pour les objectifs :
 - Maniabilité, ouvrabilité, portance, insensibilité à l'eau
 - Comportement en contexte hydraulique : perméabilité, résistance à l'érosion interne et externe
 - Propriétés mécaniques : résistance, cohésion et angle de frottement, fluage, modules

Conditions de fabrication du matériau sur site

- Mise au point, utilisation et établissement des critères des centrales de traitement

Définition du matériau « idéal »

- Bases de données de sols, liants, formulations, résultats.

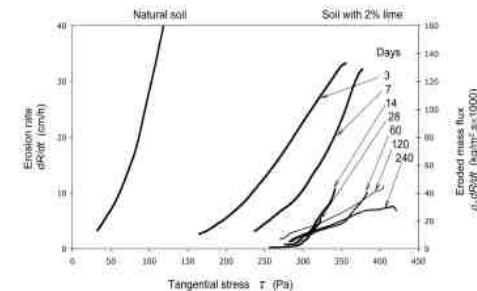
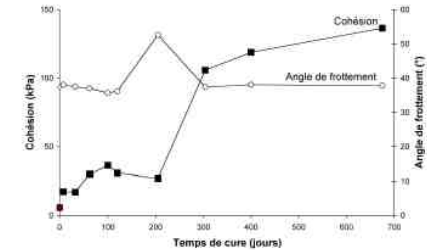




Essai de surverse

Trois types de caractéristiques doivent être connus pour concevoir la DigueELITE, à base de CONDYMAT

- Caractéristiques mécaniques : cohésion, angle de frottement, rigidité, perméabilité, ...
⇒ Connu grâce au laboratoire
- Caractéristiques de résistance à l'érosion interne : cohésion, angle de frottement, contrainte critique, indice d'érosion, ...
⇒ Connu grâce au laboratoire
- Caractéristiques de résistance à l'érosion externe
⇒ Laboratoire ..? Non !
⇒ Il faut donc **quantifier la résistance de la DigueELITE vis-à-vis de l'érosion de surface par surverse**



- Wave Overtopping Simulator
- (Van der Meer Consulting, NL)



Essais de surverse

Comment quantifier la résistance d'une digue en CONDYMAT vis à vis de la **surverse** ?

- Existe-t-il des formules universelles permettant de se passer d'essais ?
 - Non, pas pour un matériau cohésif tel que le CONDYMAT
- Peux-t-on utiliser les essais de laboratoire au Hole Erosion Test (HET) ?
 - Non, l'état de l'art ne le permet pas
- Existe-t-il des essais de laboratoire opérationnels pour la surverse ?
 - Oui, mais pas en France et il faut « apporter » la digue au laboratoire
- Existe-t-il des essais in situ spécifiques pour la surverse ?
 - Il en existe éventuellement un seul

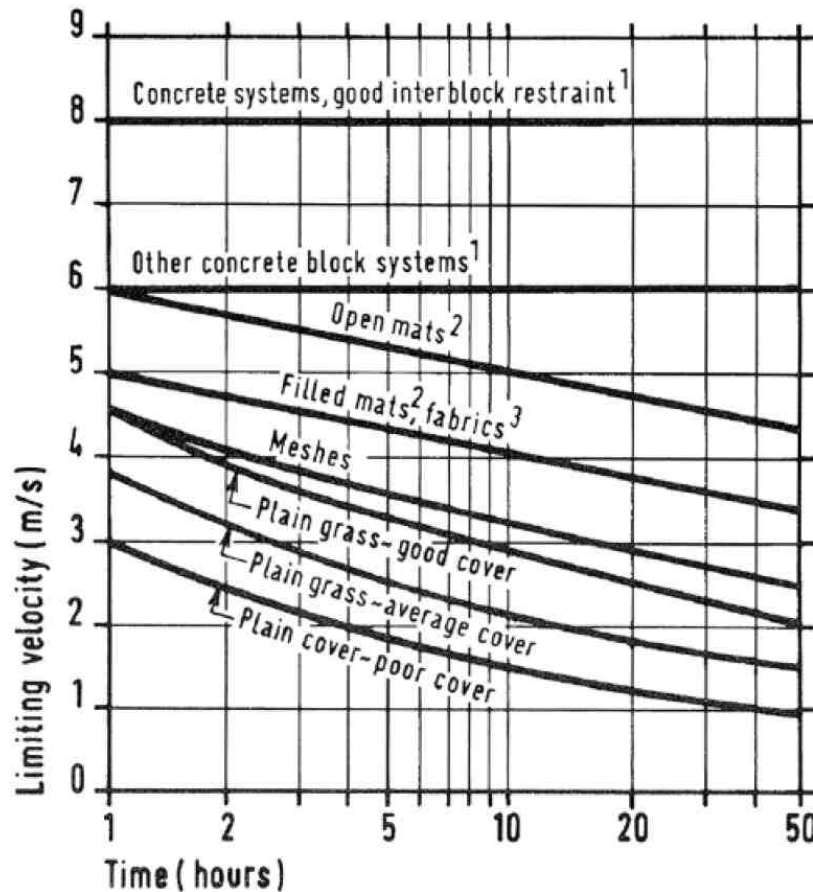


⇒ Développer un dispositif DigueElite permettant de réaliser in situ un écoulement à surface libre sur le talus aval en conditions contrôlées, en suivant au plus près la norme ASTM D6460



Essais de surverse

But Ultime : positionner le matériau sol chaux sur un abaque de type de celui du CIRIA



- Enrochements bétonnés (10 m/s)
- Dalles béton
- Blocs béton
- Protections type Macmat
- Engazonnement de qualité
- Engazonnement médiocre

Combinations of velocities and durations for acceptable erosion of various coverings due to steady overtopping (Hewlett, et al. 1987).



⇒ En maîtrisant, de façon quantitative, les principales caractéristiques de CONDYMAT, l'objectif est alors de

- Proposer une conception et un dimensionnement la DigueELITE, applicable sur un grand linéaire et dans une grande variété de contextes
- Démontrer la validité du concept
- Proposer une solution adaptée aux besoins particuliers des utilisateurs



Conception

La DigueELITE ambitionne une **conception innovante** pour exploiter tout le potentiel de CONDYMAT sur base des travaux et connaissances actuels

Matériaux traités au liant bien connus dans les **applications courantes**, bien documentées

Applications existantes **d'ouvrages** en sol traité à la chaux

- Lhoist possède de nombreuses références

Applications existantes **d'ouvrages hydrauliques** en sol traité à la chaux

- Mais en faible proportion par rapport aux remblais non traités (USA, Rép. Tchèque, France,...)

Ouvrage expérimental: Digue de Rouen

- 1,8 m de haut par 30 m de long
- Validation du procédé de mise en œuvre
- Nombreux essais de labo



Expérience des partenaires ISL, IRSTEA et EdF en ingénierie des ouvrages hydrauliques



Conception

Exemple de déroulement d'un projet **R&D en conception** d'ouvrage hydraulique :

Expérience ISL dans l'innovation des ouvrages hydrauliques : concept innovant des **barrages symétriques en remblai dur**

- **Idée** originale : Jerome Raphaël « Optimum gravity dam » - **1970**
- **Concept** développé par Pierre Londe et Michel Lino (ISL) - **1992**
« The faced symmetrical hardfill dam : a new concept for RCC »
 - ⇒ innovations sur le **matériau**
 - ⇒ innovations sur la **géométrie**
 - ⇒ innovations sur la **mise en œuvre**
- Reconnaissance **internationale** en **2001** par la CIGB dans le bulletin 117 « The gravity dam - « a dam for the future »
- CIGB Barcelone **2006** : « Barrage symétrique en remblai dur - **retour de 10 ans d'expérience**»



Nombreuses réalisations
(Japon, Turquie, Grèce,
Pérou, Algérie,...)



Marathia - Grèce
- 1993



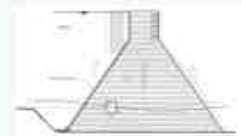
Moncion - Saint Domingue
- 1995



Rio Grande - Pérou -
2003



Cindere - Turquie -
2003



SafSaf - 2011



Conception

Réaliser une **étude de conception** complète d'une DigueELITE

- Bibliographie
- Analyse fonctionnelle de l'ouvrage
- Etude des contrastes de rigidité
- Etude des déversoirs
- Etude des ouvrages traversants
- Etude des points de conception divers d'une digue fluviale, identifiés notamment par l'analyse fonctionnelle (stabilité, perméabilité, résistance à l'érosion, suivi et auscultation,...)
- Etudes de coupes types, plans de principes
- Analyse budgétaire

Sur base de l'état de l'art, de modélisations géotechniques et hydrauliques, des résultats de laboratoire, des enseignements des démonstrateurs,...



Conception

- Mettre au point un **ouvrage démonstrateur** en vraie grandeur et en conditions réelles
- Définir **des cahiers des charges** de fabrication des mélanges et de mise en place permettant de réunir et contrôler les conditions requises pour la bonne réalisation d'une DigueELITE lors du chantier
- Définir les besoins en **maintenance et suivi** d'une DigueELITE, en y incluant l'auscultation par fibre optique, tout au long de la vie de l'ouvrage
- Produire un catalogue de **solutions types** : sur base de l'étude, des démonstrateurs et des ouvrages réels, décliner la DigueELITE dans un grand nombre de contextes envisageables:
- Etudier, sur un mode exploratoire, la conception de la **DigueELITE Maritime**
- Profiter de la dynamique DigueELITE pour suivre d'autres ouvrages hydrauliques réels en matériaux traités et **enrichir les connaissances**

Sédiments

- Des centaines de millions de m³ de matériaux extraits ou remobilisés à l'échelle mondiale.
 - Gestion des sédiments à terre - statut de déchet.
 - La part valorisable demeure intéressante mais aucune voie robuste de valorisation n'existe à ce jour.
- Un des enjeux est que les sédiments puissent être considérés comme un gisement alternatif de matériaux.
- Leur utilisation permettrait une économie de ressources en évitant l'extraction des matières premières et en limitant les transports.
- ⇒ **Condymat SED : la valorisation des sédiments**





Sédiments

- Identification des sédiments, de leur composition et de leurs propriétés
- Identification des problématiques propres aux sédiments (dont environnementales)
- Etudes de formulations





Etat d'avancement – actions techniques en cours

● **Matériaux**

- Etat des connaissances (finalisation)
- Identification, reconnaissance, cartographie du démonstrateur
- Etudes de traitement du démonstrateur

● **Conception**

- Etude de conception générale
 - Analyse fonctionnelle et définition des composants, objectifs, étude des sollicitations hydrauliques, étude géotechnique, plans et coupes types, variantes, ...
- Etude des démonstrateurs

● **Réalisation, contrôle, maintenance**

- Cahier des charges des démonstrateurs, mise en place, mélange, planches d'essais, ...
- Auscultation des démonstrateurs

● **Essai de surverse**

- Elaboration du dispositif d'essai
- Elaboration du dispositif de mesure et de quantification de l'érosion

● **Analyse du risque financier, Développement durable**



Prochaines étapes techniques

- **Mise en œuvre et exploitation des démonstrateurs**
 - Réalisation
 - Suivi de la vie du démonstrateur
 - Essai de surverse et essais géotechniques in situ
 - Suivi de la vie de l'ouvrage et valorisation des enseignements
- **Matériaux, Conception, Réalisation, contrôle, maintenance**
 - Généralisation des efforts liés aux démonstrateurs à des situations types
- **Essai de surverse**
 - Réalisation des premiers essais, mise au point finale de l'essai et exploitation
- **Sûreté et EDD**
 - Recommandations continuité écologique, paysage, végétalisation,
 - Réalisation d'une EDD
- **CONDYMAT SED**
- **DigueELITE Fluviale**



Merci pour votre attention