

**Résilience climatique des infrastructures
et intérêt des liants hydrauliques.
L'exemple particulier de l'érosion des sols**

**Cédric Le Gouil, Lucile Saussaye, Yasmina Boussafir
Cimbéton – France Ciment, Cerema, Université Gustave Eiffel**

INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

QU'EST-CE QUE LA RÉSILIENCE ?

Le GIEC (2014) a défini la résilience comme « la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement dangereux ou à une tendance ou perturbation, en réagissant ou en se réorganisant de manière à maintenir leur fonction essentielle, leur identité et leur structure, tout en conservant la capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation ».



LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE DES INFRASTRUCTURES

L'un des aspects de résilience climatique est la capacité d'un système à absorber les contraintes et à maintenir sa fonction face aux contraintes externes qui lui sont imposées par le changement climatique. **Pour les routes et les infrastructures, les efforts en termes de résilience climatique visent à réduire la vulnérabilité aux conséquences environnementales du changement climatique.**



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

Augmentation température



Augmentation précipitations



Augmentation fréquence et durée des épisodes extrêmes !!

INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

Gel - dégel



Augmentation température
Intensification des cycles gel/dégel
dans régions froides

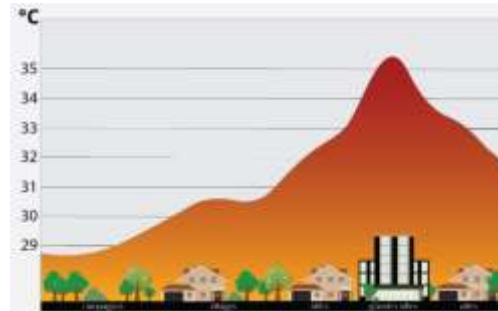
Grands incendies de forêt



et incendies « urbains »

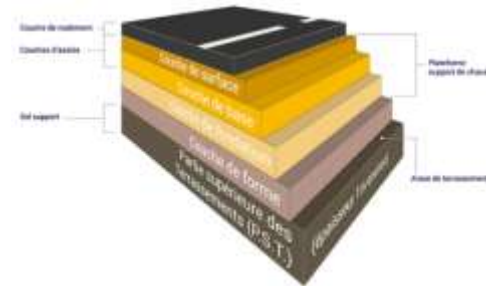
INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

CONSÉQUENCES SUR LES INFRASTRUCTURES AUGMENTATION TEMPÉRATURES



Îlots de Chaleur
Urbains

Orniérage
Déformation



Dimensionnement
structurel ↗

Surconsommation
de carburants



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

CONSÉQUENCES SUR LES INFRASTRUCTURES AUGMENTATION PRÉCIPITATIONS



Inondations



**Erosion des remblais,
talus et fondations**



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

CONSÉQUENCES SUR LES INFRASTRUCTURES **SÉCHERESSE** ET ÉPISODES PLUVIEUX



Retrait-gonflement des sols argileux



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

LES LIANTS HYDRAULIQUES / CIMENTS ET LA TEMPÉRATURE



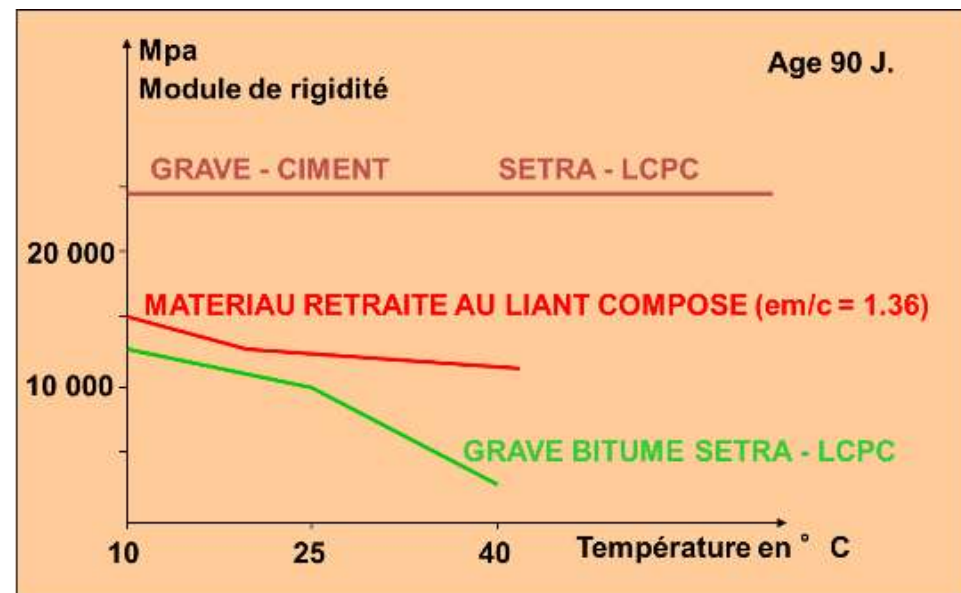
Matériaux mélangés aux liants hydrauliques / ciment « rigides »

Leur **module élastique E** peut être considéré comme « élevé »

≈ 5 000 MPa sol traité / 40 000 MPa béton

Matériaux peu/pas déformables

→ **Résistance charges canalisées, cisaillement et charges statiques (poinçonnement)**



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

LES LIANTS HYDRAULIQUES / CIMENTS ET LA TEMPÉRATURE



Rigidité « insensible » à la température (< 150°C)

Maintien des caractéristiques de surface toute T°C

Texture, adhérence : confort, sécurité et consommation de carburant

Pas d'impact dimensionnement structurel toute T°C

Durabilité « insensible » à la température

Albédo élevé limitant les îlots de chaleur

→ **Bétons adaptés aux fortes variations de température**

(moyennant disposition adaptée joints et armatures)



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

LES LIANTS HYDRAULIQUES / CIMENTS ET LE FEU

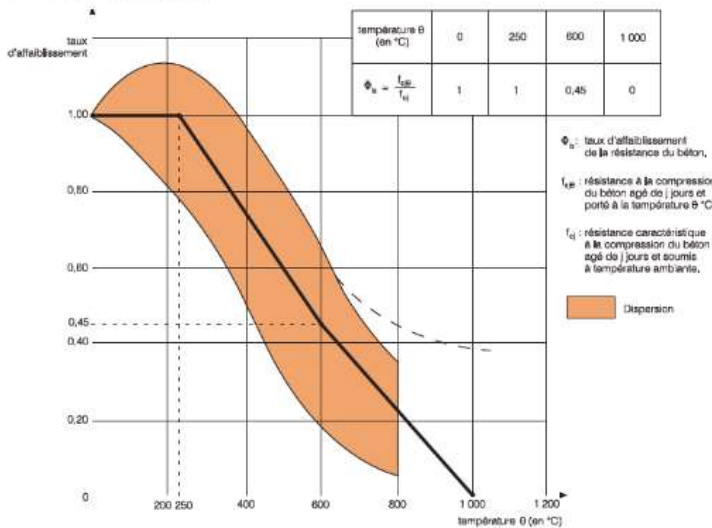


Béton classé « incombustible » MO ou A1fl

Testé surtout pour bâtiments, ouvrages d'art, tunnels

Perte résistance structurelle liée à protection des aciers - Résistance béton / 2 à 600°C

Évolution de la résistance à la compression d'un béton courant en fonction de la température (norme P 92-701)



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

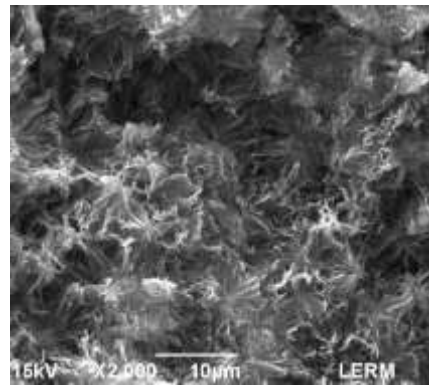
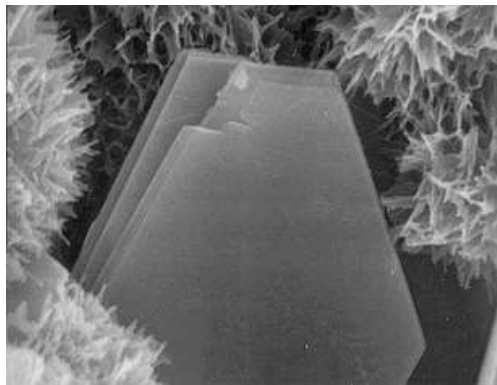
LES LIANTS HYDRAULIQUES / CEMENTS ET L'EAU



Le ciment et l'eau : un « mariage longue durée »

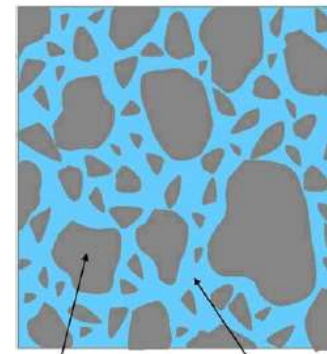
La **formation d'hydrates** est à l'origine de la **cohésion** du matériau et de son **augmentation au cours du temps**.

Hydratation continue des phases silicates (C_3S , C_2S) et aluminates (C_3A , C_4AF)
 $(C_3S, C_2S) + H_2O \rightarrow CH + CSH$ (CSH = "colle")



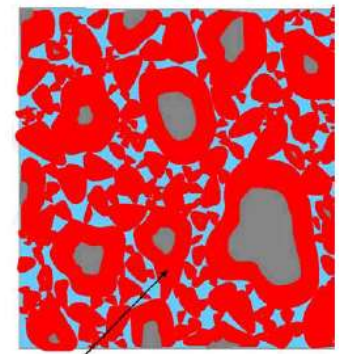
Hydratation du ciment

Dissolution



Grains anhydres Eau

Précipitation des hydrates



Hydrates

INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

LES LIANTS HYDRAULIQUES / CEMENTS ET L'EAU

Hydratation continue des liants hydrauliques

- **Augmentation continue des performances**
- **Cure dans l'eau pour maximiser les performances**



Bétons : adaptés pour matériaux drainants et structures réservoirs

- « **Résilience** » **aux inondations** (routes en béton moins sensibles aux déformations (retrait/gonflement) ou détériorations mécaniques du support



Attention : le béton aime l'eau une fois durci mais pas l'eau ajoutée à l'état frais / fabrication



INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

LES LIANTS HYDRAULIQUES / CIMENTS ET LE GEL-DEGEL

Bétons et sols traités aux liants hydrauliques \pm poreux et contiennent de l'eau \rightarrow Sensibilité au gel à vérifier ou à améliorer



Sols : 2 aspects pour apprécier la **sensibilité au gel**

\rightarrow La **dégradation** des roches et des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par « **gélifraction** »

Fragmentation ou microfissuration des roches poreuses

\rightarrow Le **gonflement** au gel des sols par « **cryosuccion** »

Gonflement pendant le gel et perte de portance au dégel

Sols insensibles au gel si :

Insensibilité à l'eau (granulométrie, argilosité...) +
critères physiques (absorption d'eau) ou
mécaniques (LA-MDE, classe F4 au gel, $R_{it} \geq 0,25$ MPa...),
insensibles à la cryosuccion



Photographie 17: Effet du gel sur matériau fin limono-argileux.
Éprouvette de sol après un essai de gonflement au gel. La partie haute (située à gauche de la photo) est celle sollicitée par une température négative et la partie basse (à droite sur la photo) est plongée dans de l'eau à température positive. Le gradient de température provoque le phénomène de cryosuccion dans les sols très gélifs, c'est-à-dire une aspiration de l'eau libre vers les zones de température négative, et des lentilles de glace se matérialisent au niveau du front de gel (Source : Cerema)

INTRODUCTION - Résilience climatique des infrastructures

LES LIANTS HYDRAULIQUES / CIMENTS ET LE GEL-DEGEL

Bétons et sols traités aux liants hydrauliques sont +/- poreux et contiennent de l'eau → Sensibilité au gel à vérifier ou à améliorer



Bétons : 2 approches techniques pour apprécier la **sensibilité au gel et aux sels de déverglaçage**

→ **Bétons avec « air entraîné »** afin de générer des « vases d'expansion » diminuant les pressions de gonflement générées par le gel.

→ **Bétons à compacité et résistance très élevées** permettant de limiter les pressions générées et de leur résister.



Cartes de gel et de salage



On vérifie la **résistance au gel interne et à l'écaillage** :

Paramètres de formulation (granulats non gélifs, dosages mini en liant et maxi en eau, entraîneur d'air...), facteur d'espacement des **bulles d'air** générées, **essais de performance** sur béton (G+S)...



Essai
L barre

Ouvrages Hydrauliques et Érosion des sols :

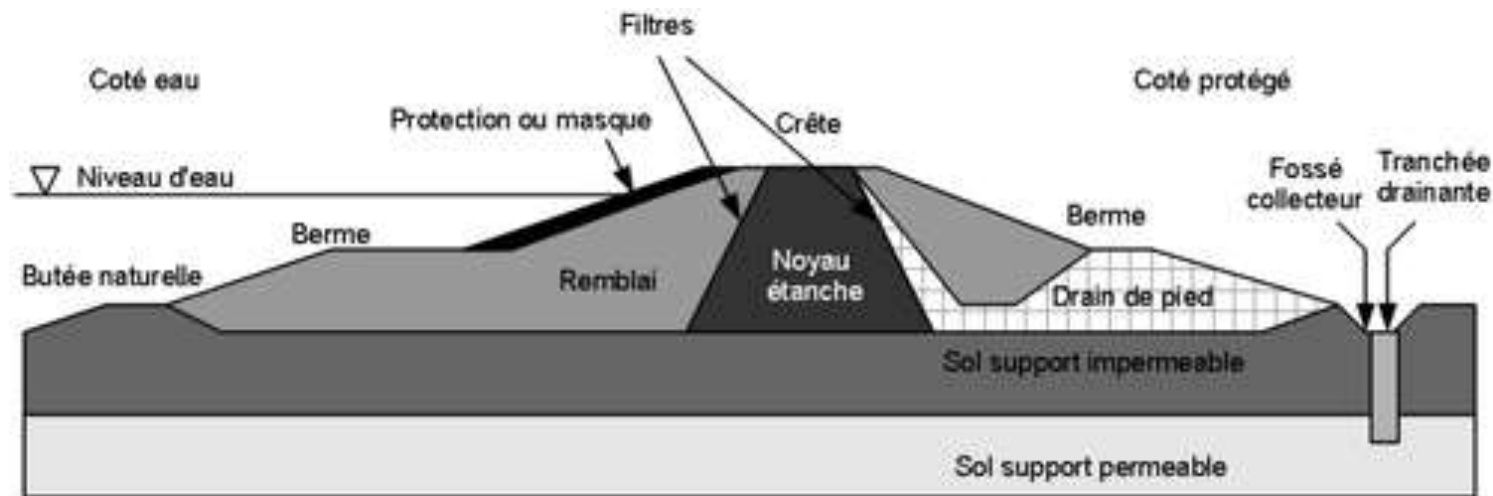
Place aux expertes !



CONTEXTE DE L'ETUDE

- **Digues de protection contre les inondations**
 - **Ouvrages en terre (transposition possible aux remblais)**
 - **Fonctions principales :**
 - **retenir temporairement l'eau**
 - **canaliser les écoulements vers l'aval**
 - **contrôler les déversements d'eau**
 - **Leurs composants leur permettent d'assurer leur stabilité**

CONTEXTE DE L'ETUDE



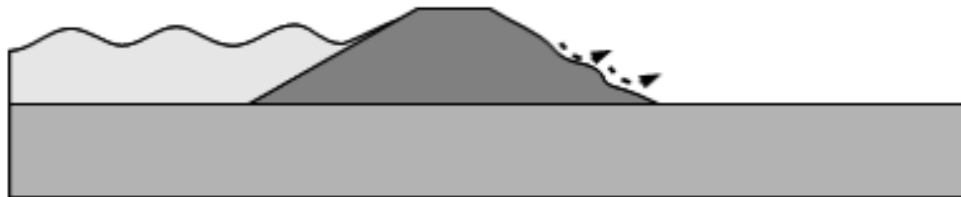
D'après ILH (Y. Deniaud)

- fondation ou sol support
- **corps de digue (stabilité propre)**
- **noyau ou masque amont (étanchéité)**
- **protections mécaniques (côté eau, en crête et côté terre)**
- filtres, drains
- risbermes, butées de pied, para fouille
- structures de couronnement (rehausses, pare-vagues...)

CONTEXTE DE L'ETUDE

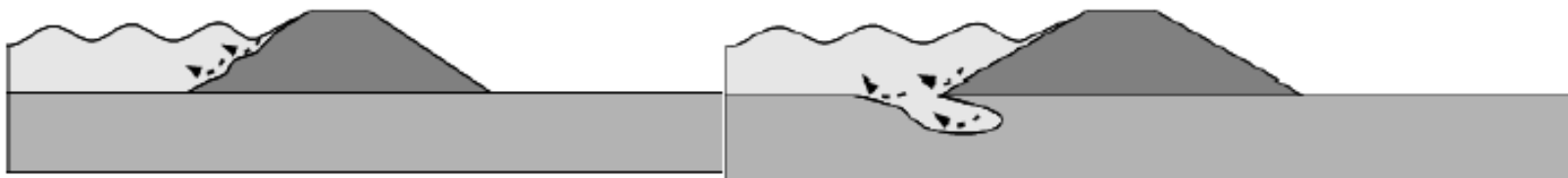
Erosion externe : arrachement de matériaux sur une surface extérieure de la digue

- côté terre



Arrachements de particules de sols

- côté eau



Arrachements de particules de sols

Arrachements de particules de sols

CONTEXTE DE L'ETUDE

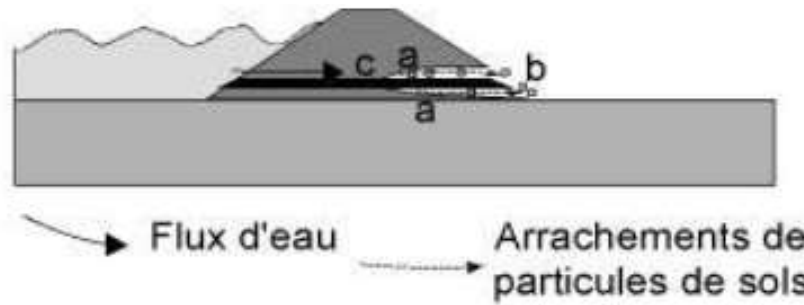
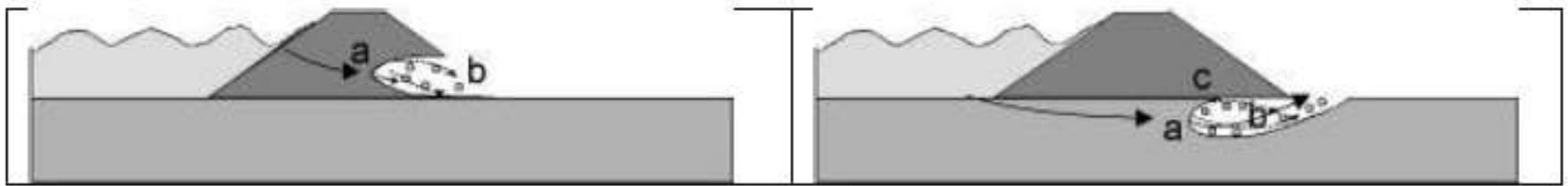
Exemple de détériorations par érosion externe



Saint-Benoît-sur-Loire
Encoche d'érosion dans la risberme

CONTEXTE DE L'ETUDE

Erosion interne : entraînement de particules sous l'effet d'un écoulement dans l'ouvrage ou sa fondation ; les phénomènes peuvent se développer dans ou sous l'ouvrage



a - érosion régressive ; b - érosion concentrée ; c - érosion de contact

CONTEXTE DE L'ETUDE



CONTEXTE DE L'ETUDE

- **Digue DOFEAS-Lhoist : limon A1 + 2,5% CaO**



CONTEXTE DE L'ETUDE

- **Érosion externe :**
essais in situ avec
l'érodimètre à jets
mobiles



- **Érosion interne :** essais en laboratoire d'érosion
de trou (HET) sur échantillons carottés

➔ **Amélioration avec le traitement de la
résistance à l'érosion du matériau**

Sol non traité



Sol traité à la chaux



CONTEXTE DE L'ETUDE



CONTEXTE DE L'ETUDE

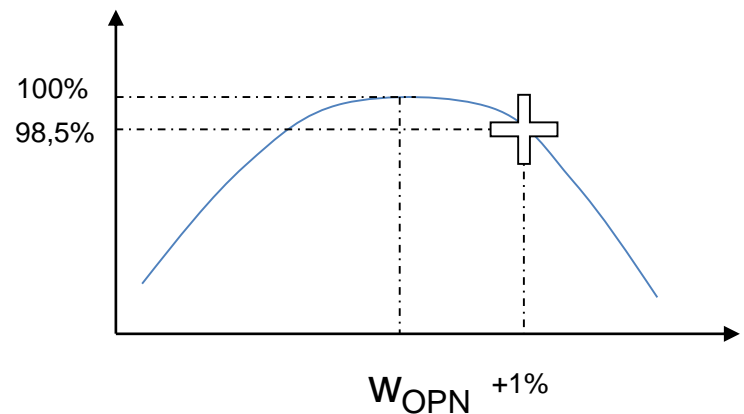
Autres projets...

- ✓ Dignes en Belgique
- ✓ Dignes de la CNR
- ✓ Dignes du SYMADREM dont Digue 2020
- ✓ Dans le cadre du projet du CSNE :
 - réemploi des limons
 - réemploi des craies

→ vérifier la faisabilité du traitement des sols aux LH pour améliorer la résistance à l'érosion des sols

EXEMPLE DE L'ÉROSION DES SOLS

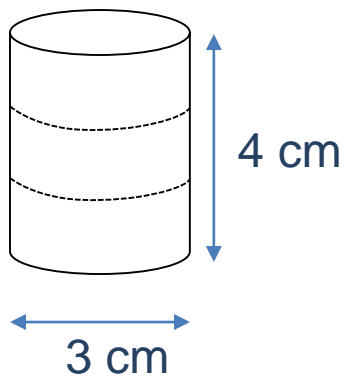
- **Deux sols naturels :**
 - limon A1 en provenance de Cizancourt (Canal Seine-Nord Europe)
 - sable limoneux B5 provenant de la digue de Sandillon
- **Deux LHR :**
 - à prise rapide E4
 - à prise lente N4
 - à 2 et 4%
- **Confection des éprouvettes :**
 - 98,5% ρ_{dOPN}
 - $W_{OPN} + 1\%$



Caractérisation initiale & préparation des matériaux

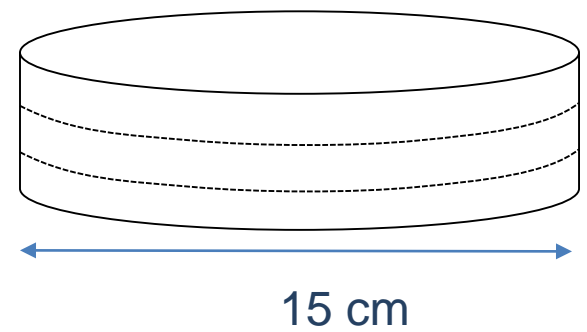
• Confection des éprouvettes

Eprouvette essai d'émiettage



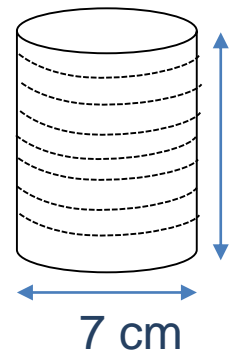
3 couches
10 coups / couche

Eprouvette MoJet



3 couches
56 coups / couche

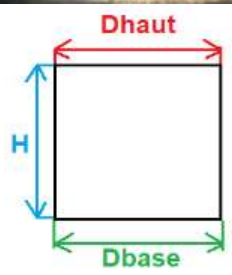
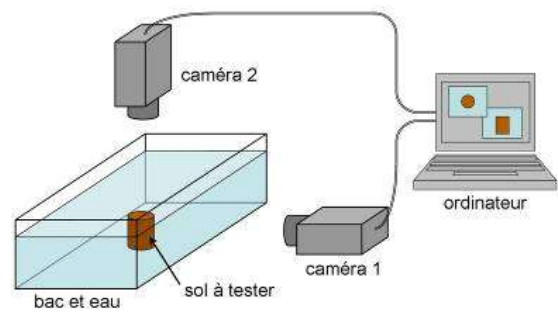
Eprouvette HET



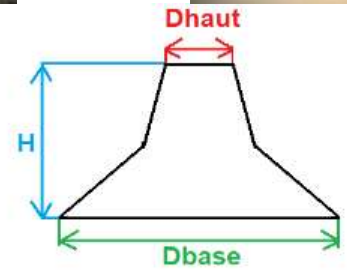
8 couches
10 coups / couche

Essais d'émiettage (comportement à l'immersion)

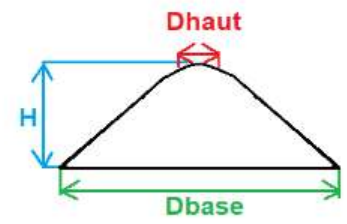
• Principe de l'essai



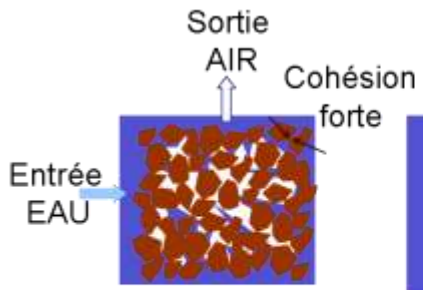
Etat initial



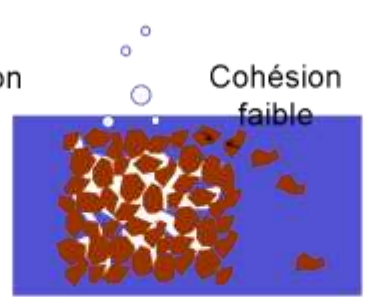
Etat intermédiaire



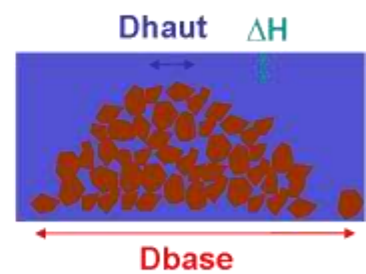
Etat final



État initial

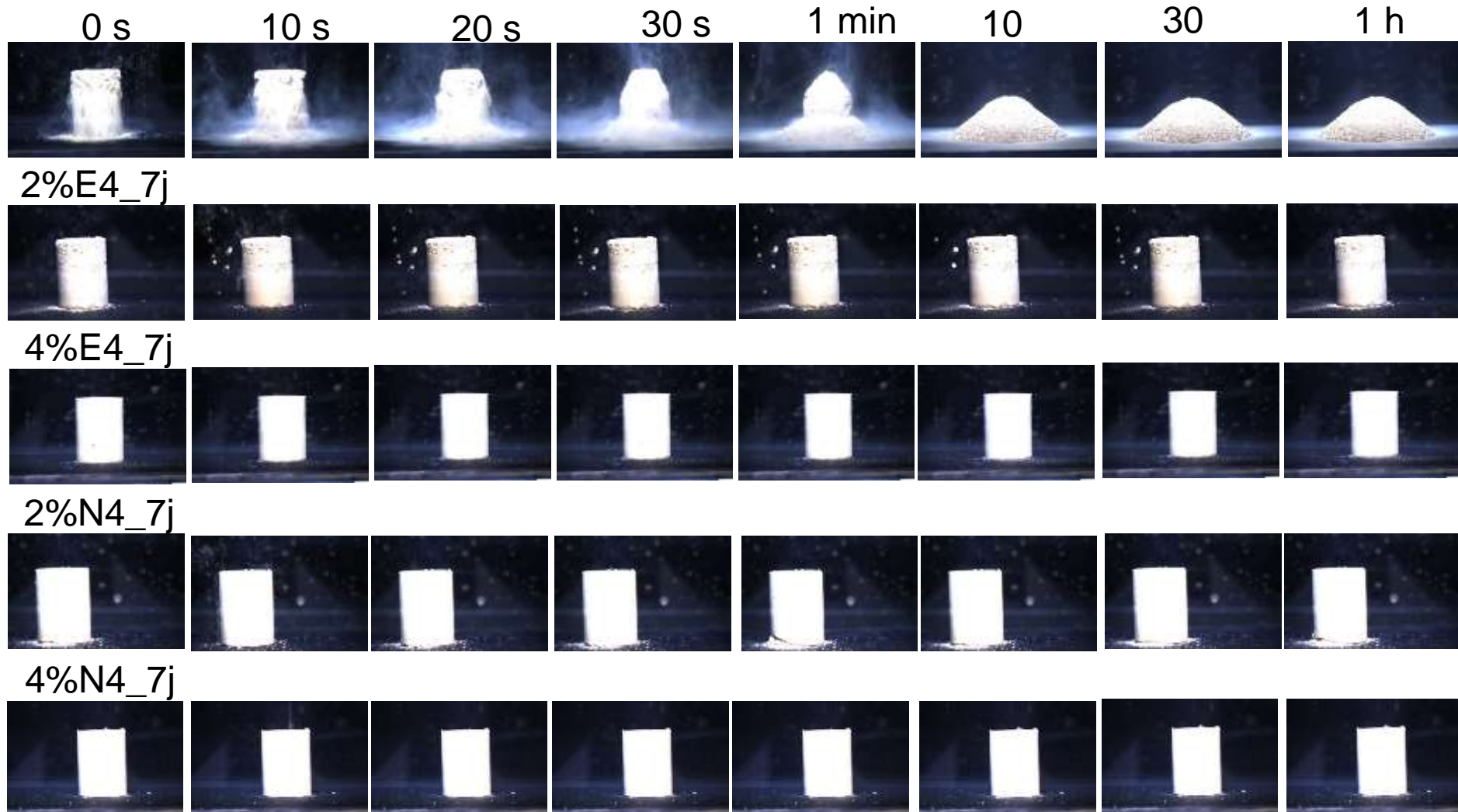


Début désagrégation



Fin désagrégation

Essais d'émiettage – LIMON de CIZANCOURT



Essais d'émiettage – SABLE LIMONEUX de SANDILLON

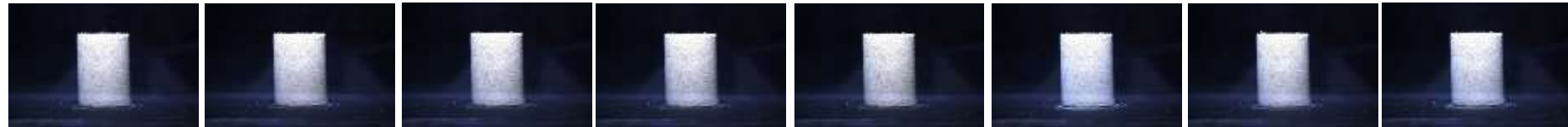
0 s 10 s 20 s 30 s 1 min 10 min 30 min 1 h



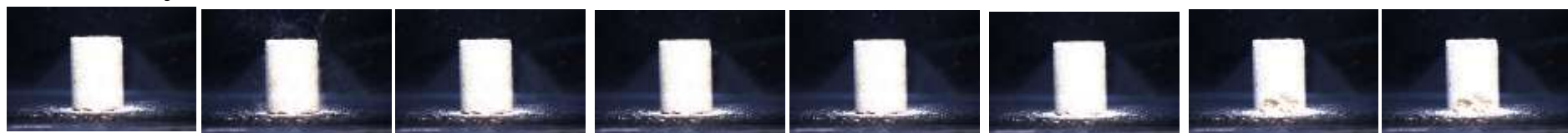
2%E4_7j



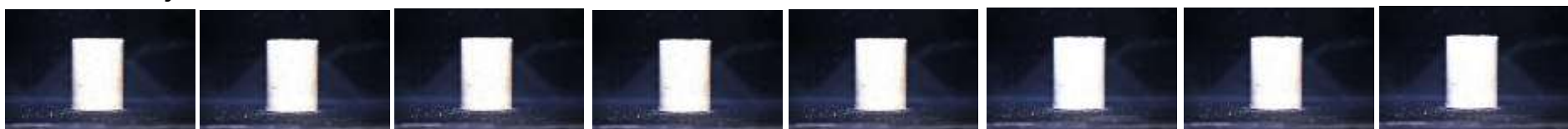
4%E4_7j



2%N4_7j

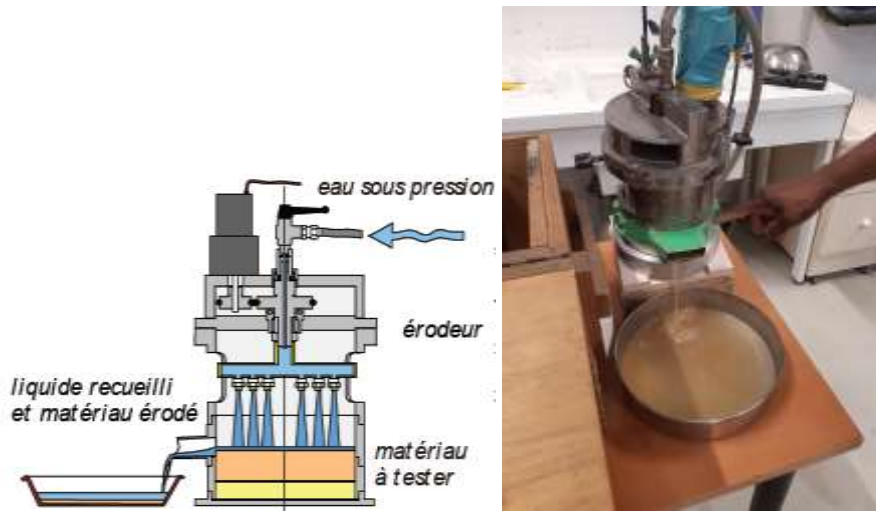


4%N4_7j



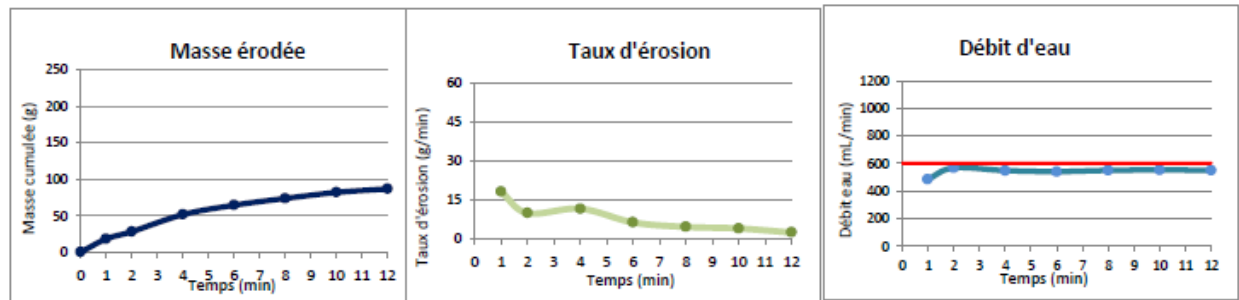
Essai MoJet (érosion externe)

• Principe de l'essai



Deux débits pour les jets :

- 600 ml / min
- 1 200 ml / min



Essai MoJet

- Principe de l'essai







2% N4_28 jours
600 ml / min



2% N4_28 jours
1200 ml / min

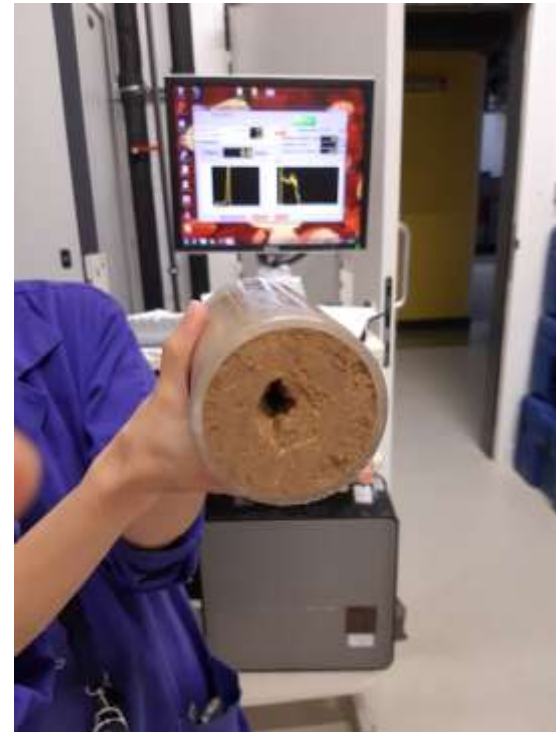
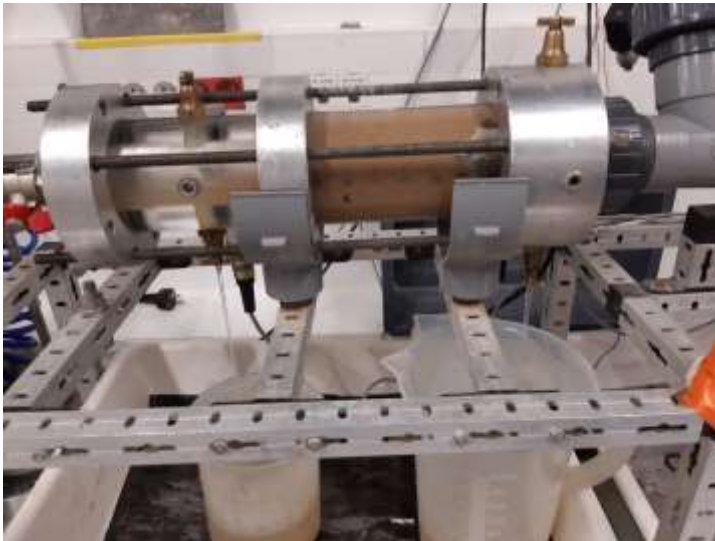


Essai MoJet – 1200 ml / min

	Sable limoneux - Sandillon		Limon - Cizancourt	
N4	 <p>2% N4_28 j</p>	 <p>4% N4_28 j</p>	 <p>2% N4_28 j</p>	 <p>4% N4_28 j</p>
E4	 <p>2% E4_28 j</p>	 <p>4% E4_28 j</p>	 <p>2% E4_28 j</p>	 <p>4% E4_28 j</p>

Essai HET

- Principe de l'essai



Essai HET

	Sable - Sandillon	Limon - Cizancourt
N4	  <p>2% N4_28 j 4% N4_28 j</p>	  <p>2% N4_28 j 4% N4_28 j</p>
E4	  <p>2% E4_28 j 4% E4_28 j</p>	  <p>2% E4_28 j 4% E4_28 j</p>

CONCLUSION

- **Un programme d'essai complet :**
 - émiettage à 90 jours
 - MoJet sur matériau non traités et sur éprouvettes à 28 et 90 jours
 - HET sur matériau non traité et sur éprouvettes à 28 jours
- **Des résultats intéressants :**
 - **Une variabilité des performances qui dépend :**
 - du liant utilisé (E4 > N4)
 - de la nature du matériau traité (limon > sable limoneux)
 - du délai de cure pour le N4
 - **Une augmentation de la résistance à l'érosion externe à valoriser (entre autres) en protection externe en talus**

Merci de votre attention

Yasmina BOUSSAFIR
Université Gustave Eiffel
Laboratoire Sols Roches et Ouvrages géotechniques
Cité Descartes - 5 Boulevard Descartes
Champs-sur-Marne 77454 Marne-la-Vallée
01 81 66 82 06 / yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

Lucile SAUSSAYE
CEREMA DTerNC/AB/RTNE
11 rue Laplace / 41000 BLOIS
02 54 55 49 43 / lucile.saussaye@cerema.fr

Cédric LE GOUIL
Cimbéton – France Ciment
16 bis boulevard Jean Jaurès 92100 Clichy
06 60 35 32 04 / c.legouil@cimbeton.net

