



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Gestion des Données et Nouvel Environnement Numérique en Géotechnique

QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN GÉOTECHNIQUE

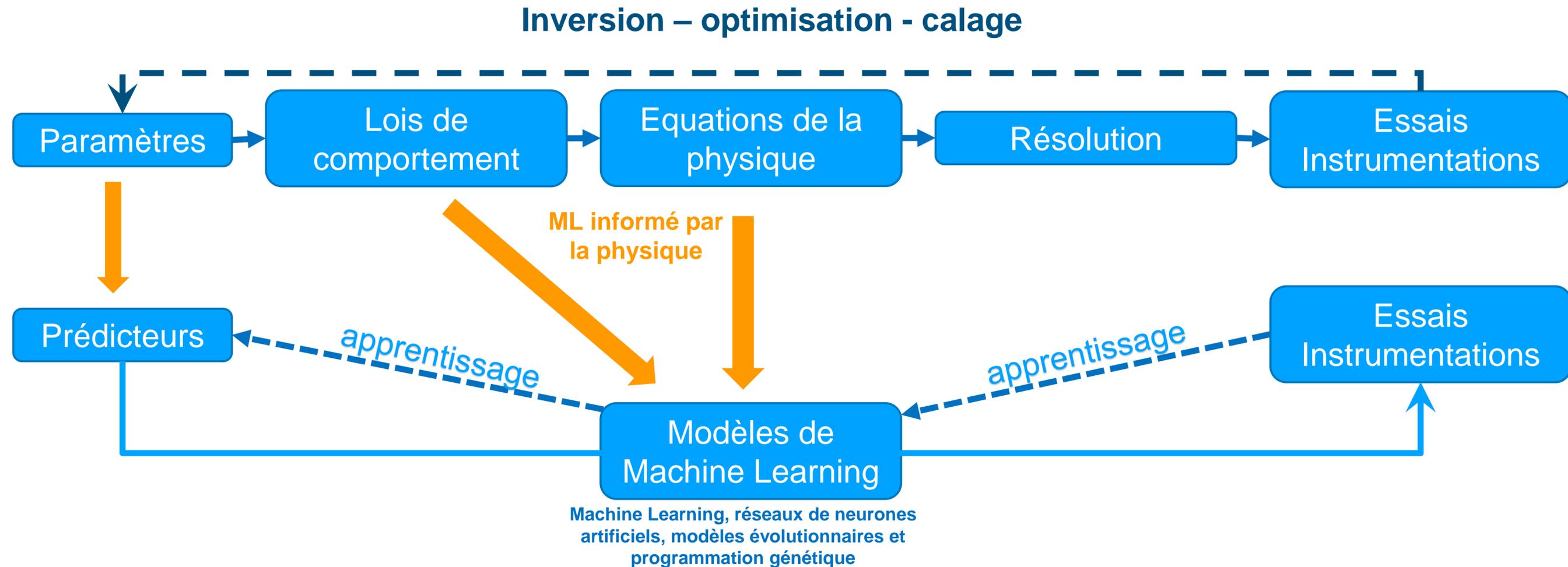
ABDALLAH, Adel

15 NOVEMBRE 2022



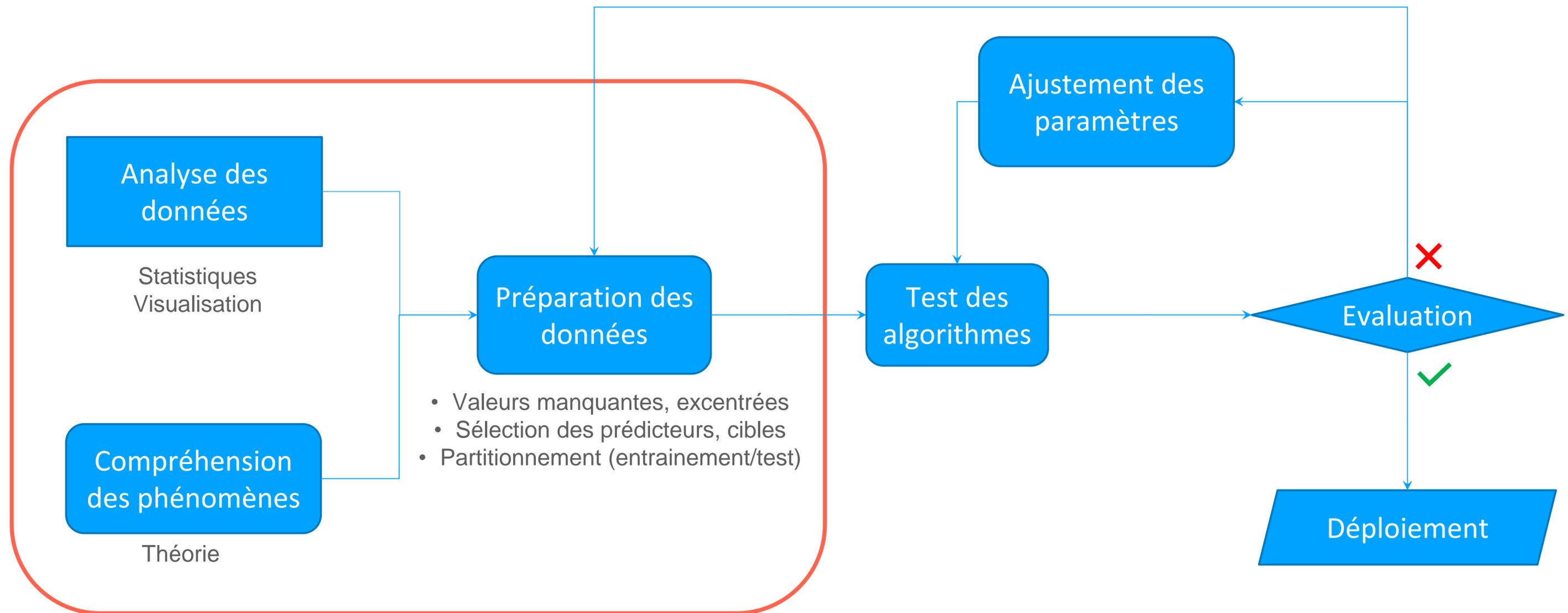
Les modèles basés sur les données

Concepts



Les modèles basés sur les données

Démarche



Exemples de modèles basés sur les données

Etude de l'acquisition de résistance d'un sable traité au ciment

BDD de source unique



cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

1

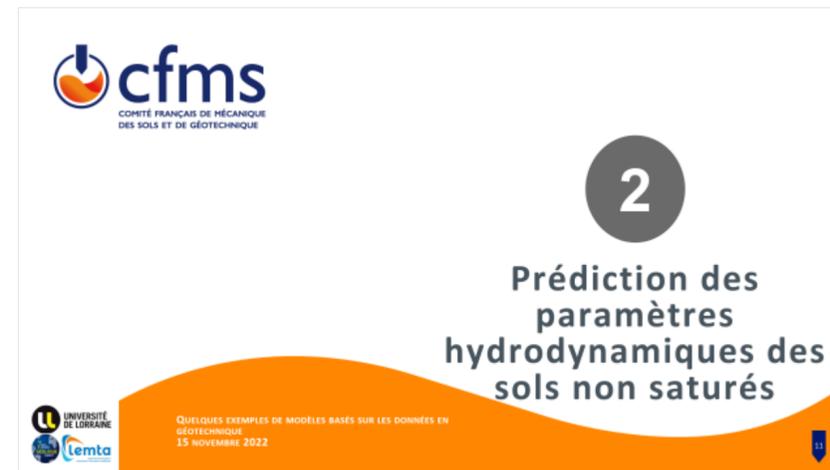
Etude de l'acquisition
de résistance d'un sol
traité au ciment

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
lemta

QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN
GÉOTECHNIQUE
15 NOVEMBRE 2022

Prédiction des paramètres hydrodynamiques des sols non saturés

BDD de sources multiples



cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

2

Prédiction des
paramètres
hydrodynamiques des
sols non saturés

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
lemta

QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN
GÉOTECHNIQUE
15 NOVEMBRE 2022

Surveillance d'un pont-rail vis-à-vis des chocs de véhicules

Instrumentation d'ouvrages



cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

3

AU.D.A.C.E

Surveillance
d'un pont-rail SNCF

lemta SNCF

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
Cerema

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
lemta

QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN
GÉOTECHNIQUE
15 NOVEMBRE 2022



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

1

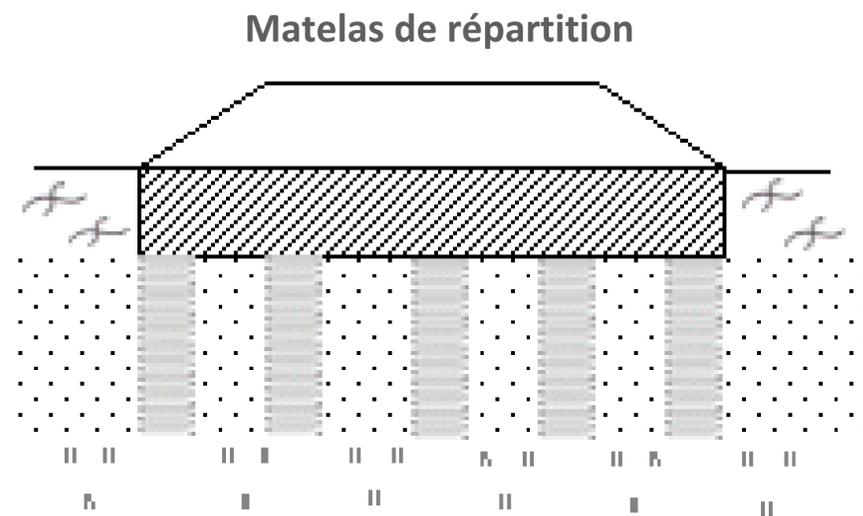


Wassermann (2019-2023)
Khan (2022-2025)

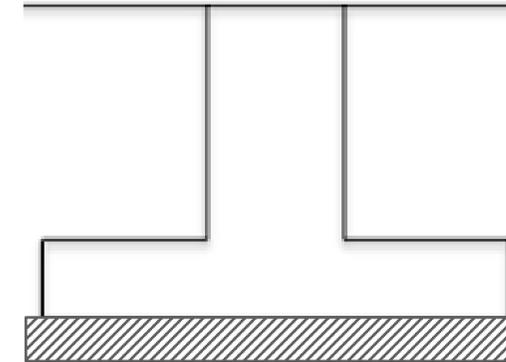
Etude de l'acquisition de résistance d'un sol traité au ciment

Les applications du traitement des sols aux liants hydrauliques

Questions : gain de performances et durabilité ?

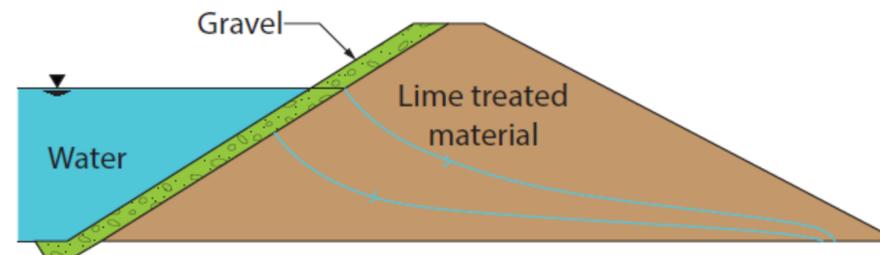


Couche d'assise pour des fondations

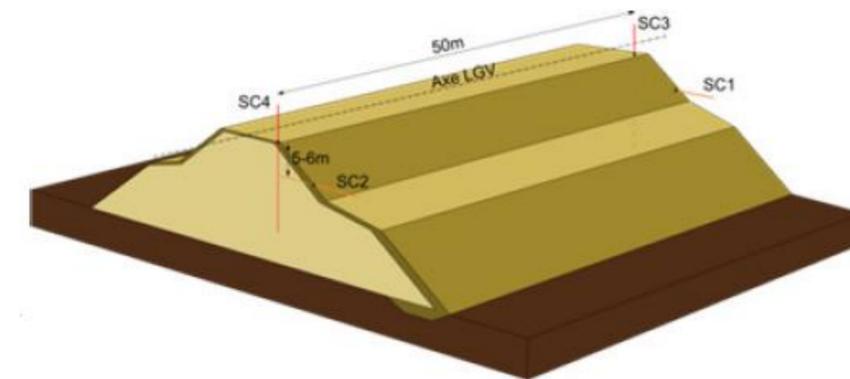


Traitement des sols

Ouvrages hydrauliques en terre



Encagement



L'acquisition de résistance des sols traités aux liants hydrauliques

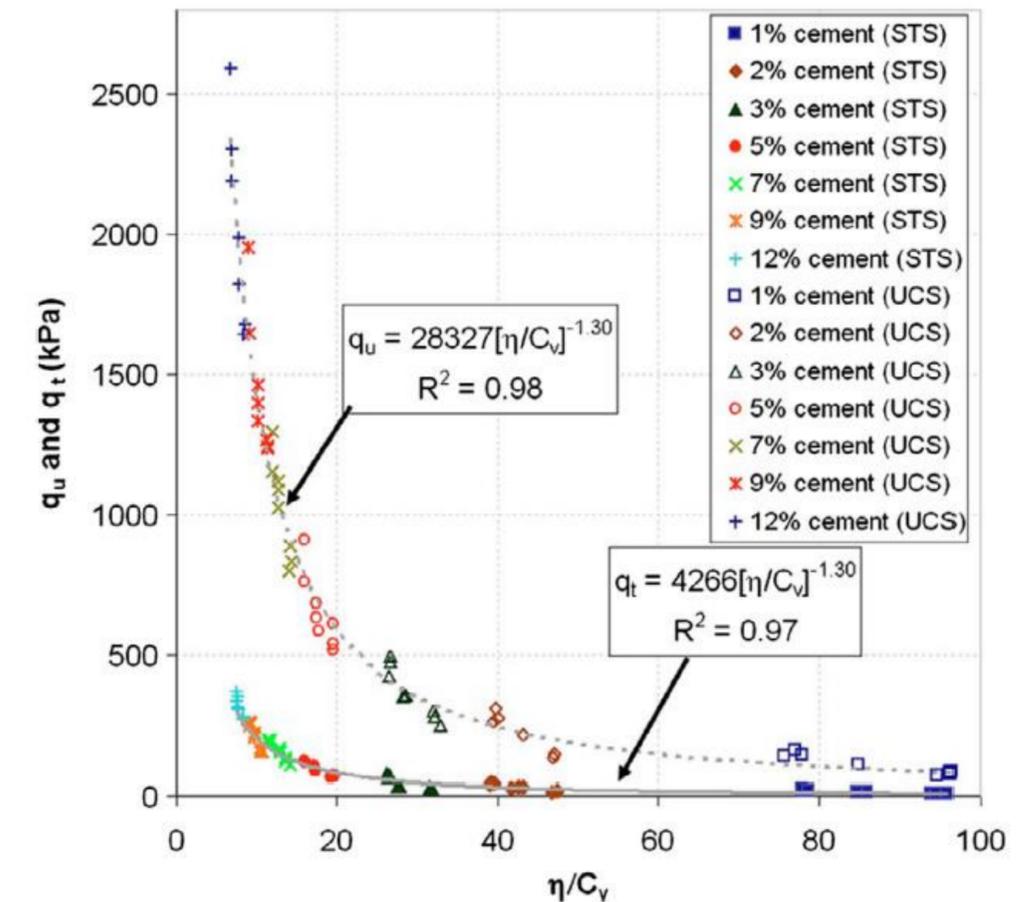
Processus chimiques

- Hydratation du ciment
- Réaction pouzzolanique
- Carbonatation
- Succion

Paramètres influents

- Conditions de compactage
- Dosage en liant
- Propriétés du sol (minéralogie, granulométrie, plasticité)
- Conditions de cure

Consoli et al. 2010
Diambra et al. 2018

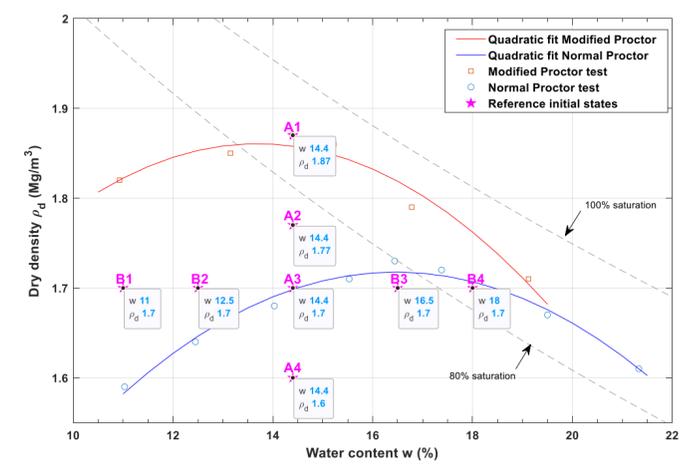


La base de données

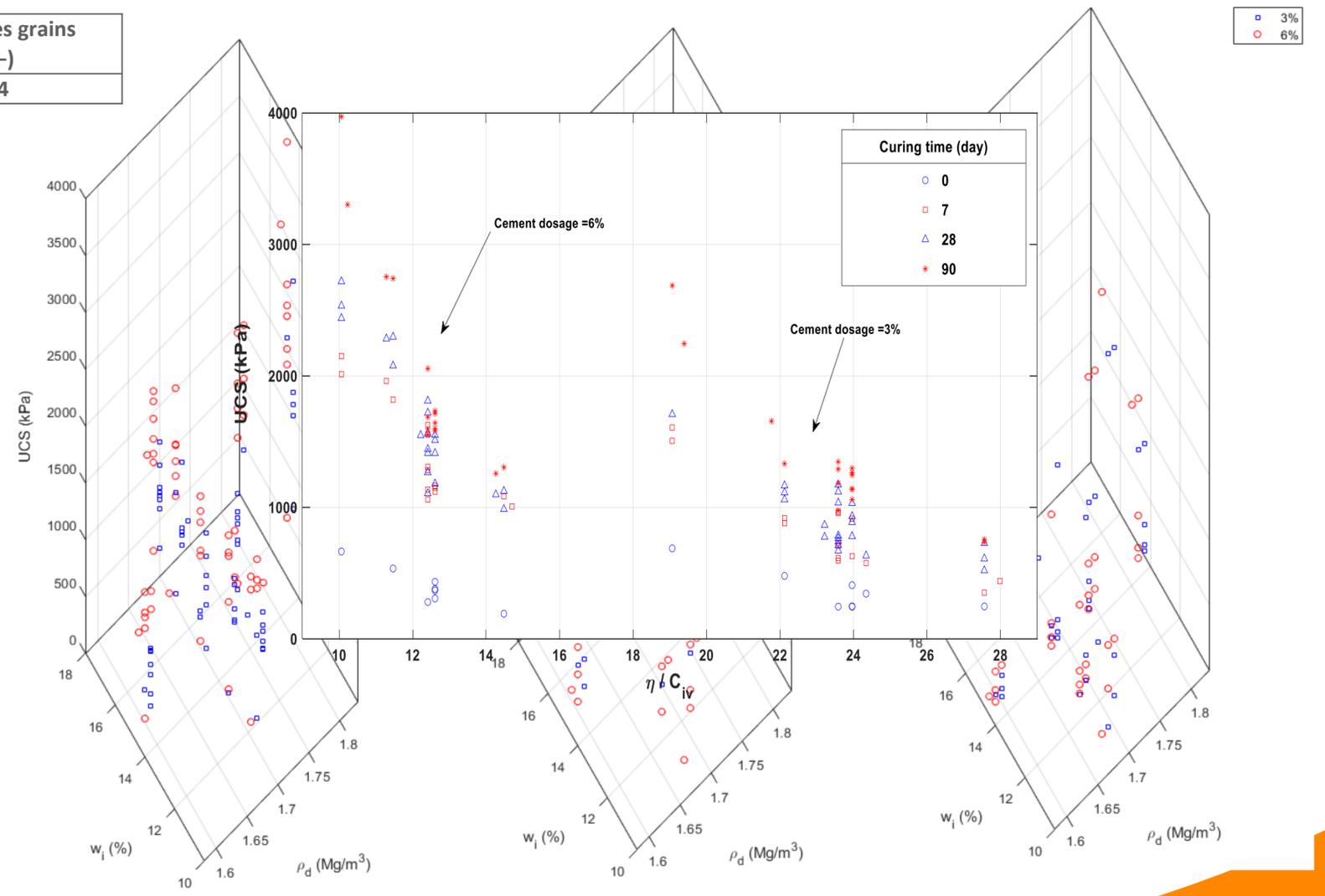
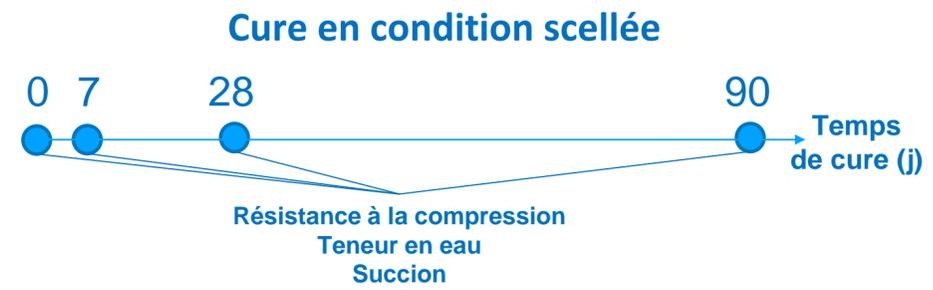
Essais de laboratoire :

Limon A2

Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité (%)	Passant à 80 µm (%)	Passant à 2 µm (%)	Densité des grains G_s (-)
28.5	8.0	99.2	6.0	2.64



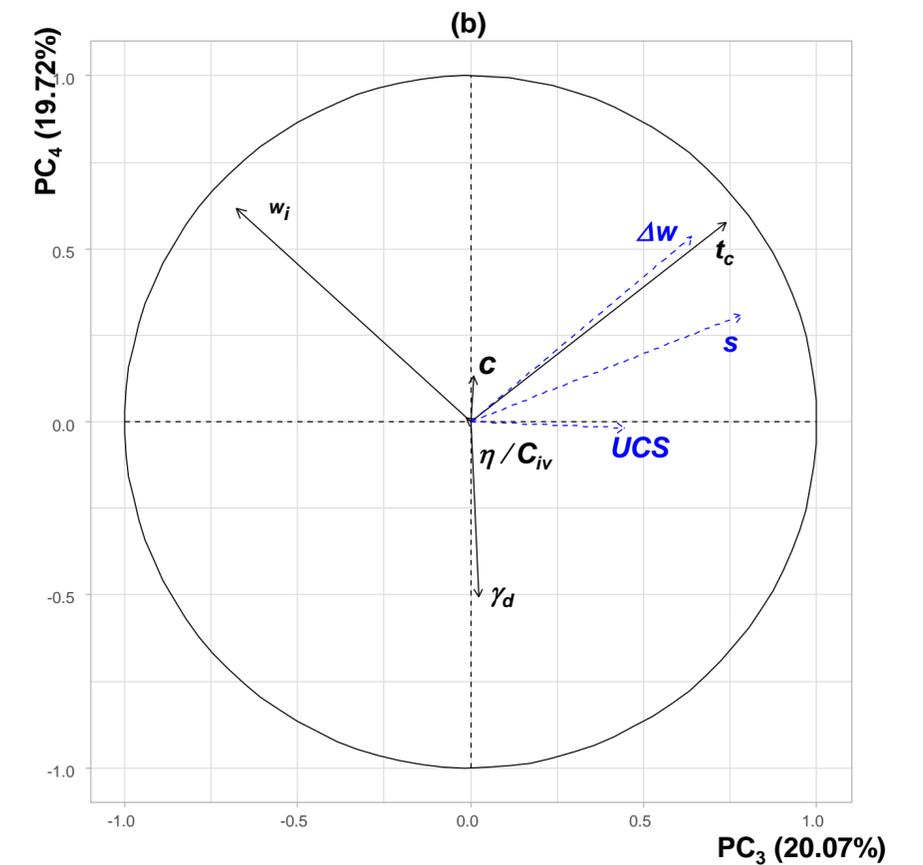
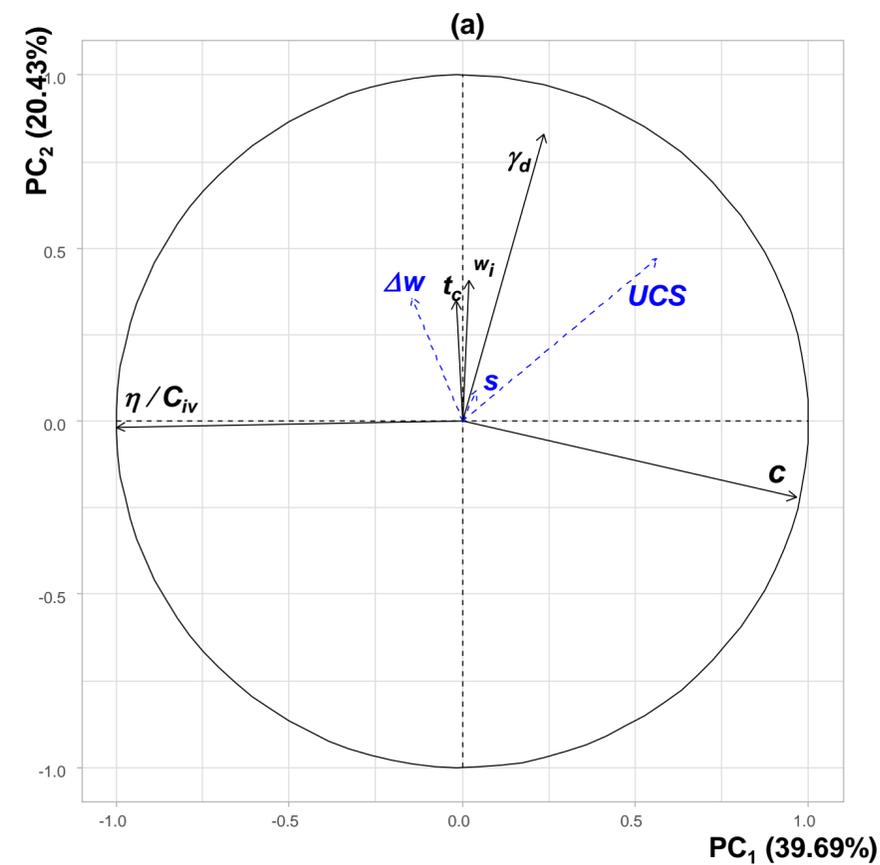
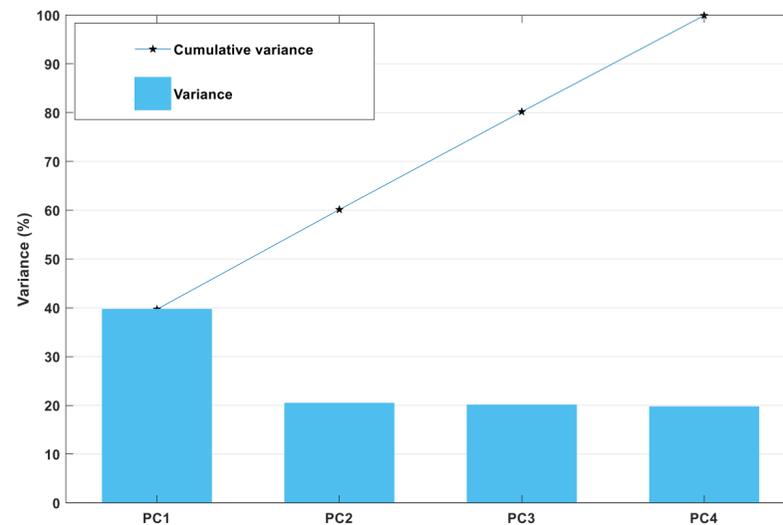
Limon
+
3-6% ciment
Teneur en eau
Densité sèche
Dosage



Paramétrisation – Recherche de prédicteurs

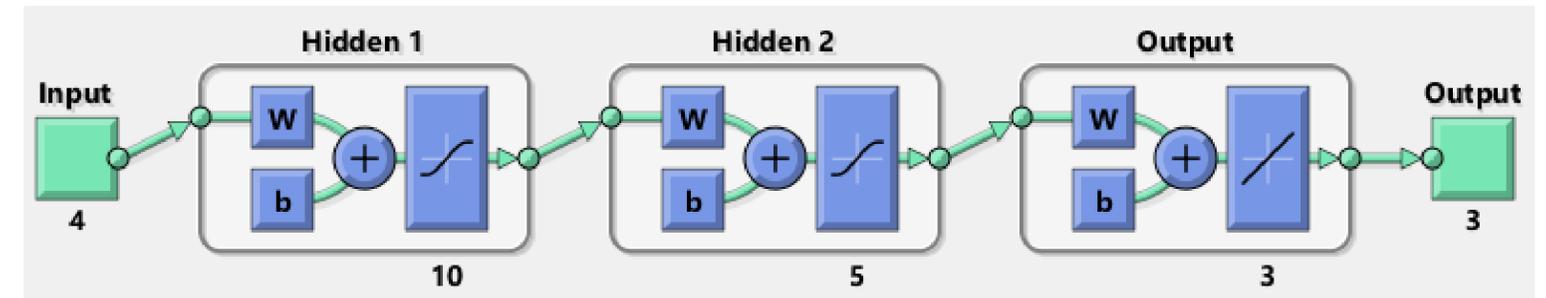
Analyse en Composantes Principales

- Données centrées réduites
- Variables actives : w_i , γ_d , c , t_c et η/C_{iv}
- Variables désactivées : Δw , s , UCS

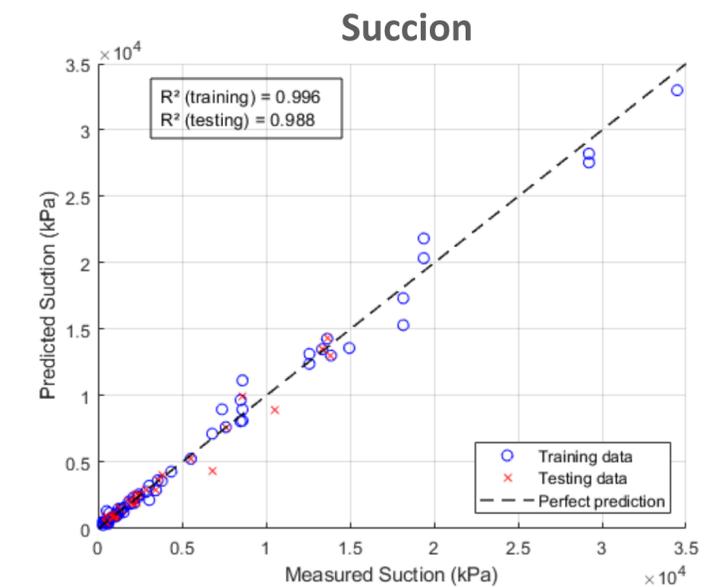
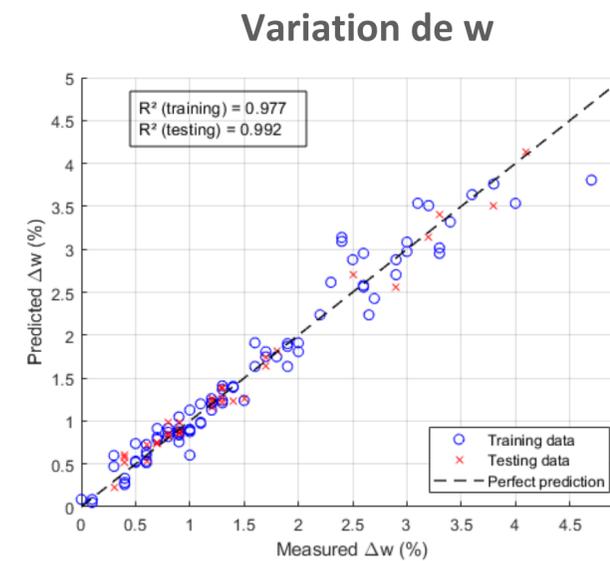
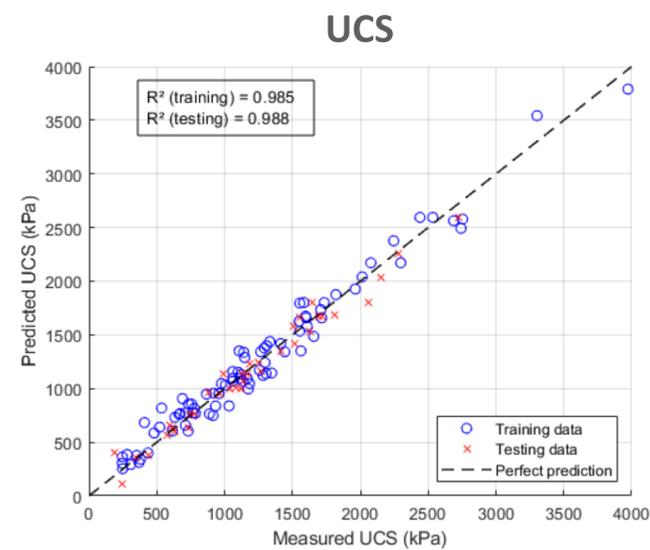
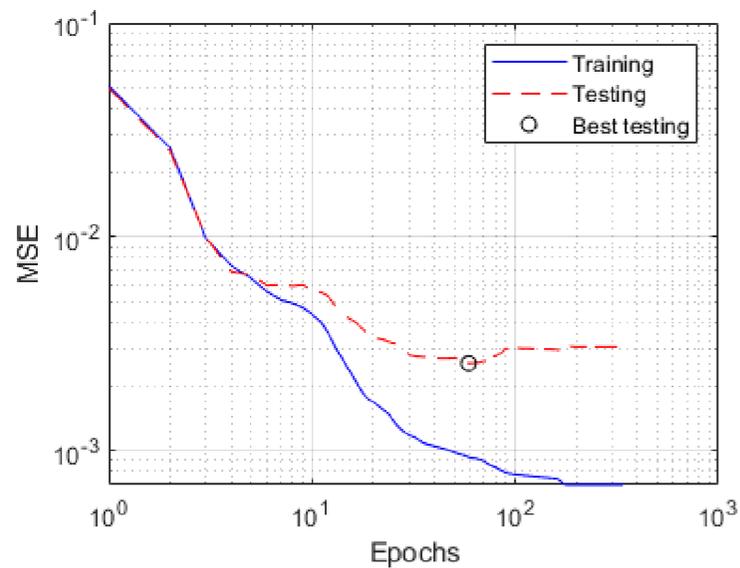


Réseau de Neurones Artificiels

84 données pour l'apprentissage (70%)
36 données pour les tests (30%)



Apprentissage du modèle



Éléments de synthèse

- Prédiction satisfaisante des propriétés post-cure
- L'ACP a permis de trouver des prédicteurs pertinents
- Généralisation du modèle ?

Perspectives :

- Enrichir la base de données : essais triaxiaux, conditions de cure, types de sols
- Améliorer le modèle : apprentissage par renforcement ?, incorporation de la physico-chimie ?



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

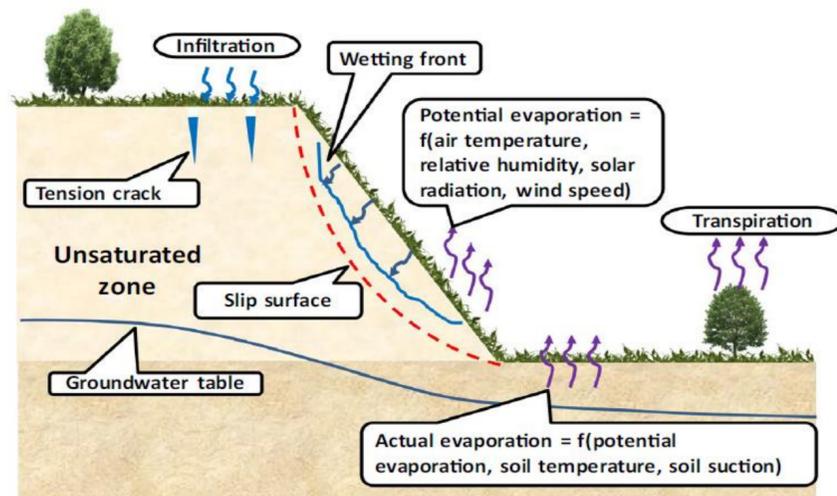
2

Abdallah (2019, 2021)

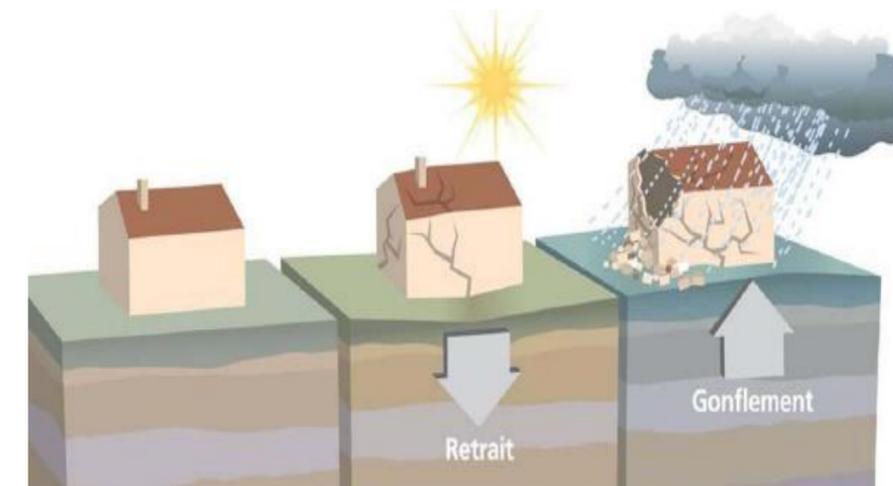
Prédiction des paramètres hydrodynamiques des sols non saturés

QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN
GÉOTECHNIQUE
15 NOVEMBRE 2022

Les domaines d'application de l'hydrodynamique des sols non saturés



Stabilité des pentes (Rahardjo *et al.* 2019)



Retrait-gonflement des argiles (Vincent *et al.* 2009)



Fissuration des sols

(Courtesy of Flickr: Photo by Yuna Mika)

- Géotechnique appliquée à l'Environnement et à l'exploitation minière
- Séquestration de CO₂, Stockage de l'énergie dans les sols
- Agronomie,

...

Les équations de l'hydrodynamiques des sols non saturés

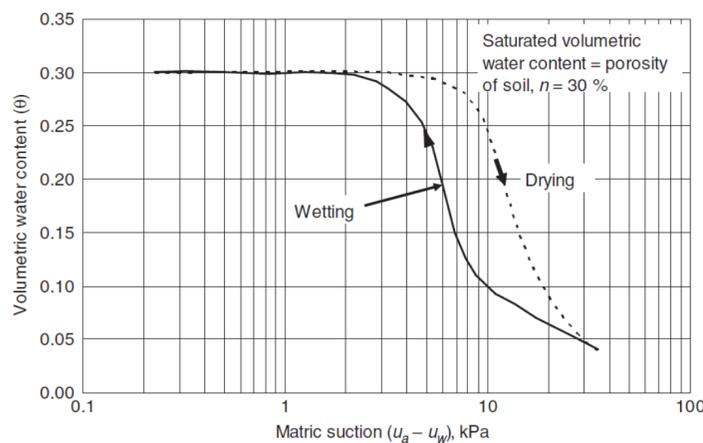
Richards (1931)

$$\frac{\partial \theta(\Psi)}{\partial t} = \frac{\partial \theta(\Psi)}{\partial \Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(k(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1 \right) \right)$$

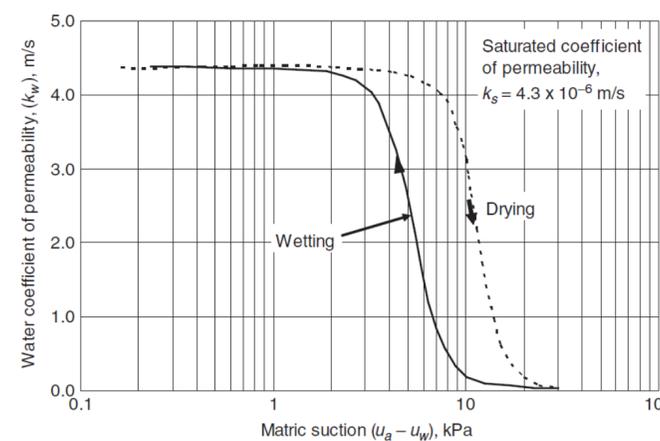
θ , teneur en eau volumique
 h , potentiel hydrique
 t , temps
 z , profondeur
 k , conductivité hydraulique

Les paramètres hydrodynamiques dans les milieux non saturés :

Courbe de rétention de l'humidité



La courbe de conductivité hydraulique non saturée



van Genuchten (1980) – Mualem (1976):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m}$$

$$k(s) = k_s \left[\frac{(1 - (\alpha \Psi)^{n-1} [1 + (\alpha \Psi)^n]^{-m})^2}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^{m/2}} \right]$$

Restrictions sur m et n :

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad m \rightarrow \infty$$

La détermination des paramètres hydrodynamiques des sols non saturés

Essais de laboratoire :

- Imposition de succion et mesure de la teneur en eau
- Séchage/humidification d'une éprouvette en mesurant la succion ou la teneur en eau
Méthode des profils instantanés, inversion numérique

Les bases de données :

- **UNSODA**
- HYPRES, STARING,

Les fonctions de pédo-transfert (PTF)

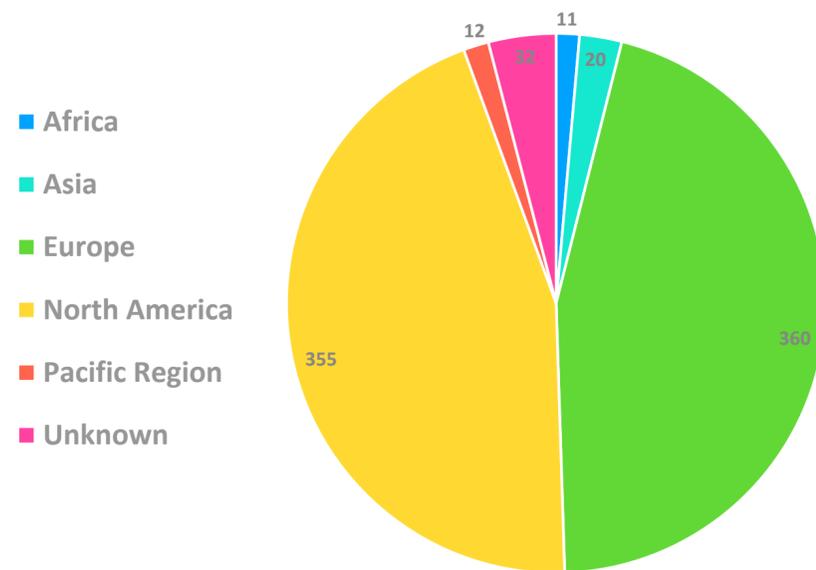
Modèles basés sur la courbe granulométrique

Haverkamp et Parlange (1986)
Fredlund *et al.* (2002)

Les données

UNsaturated SOil hydraulic DAtabase UNSODA (Leij et al. 1996)

- Des résultats d'essais de laboratoire en séchage et en humidification (+60 k entrées)
- Des paramètres géotechniques d'identification



Origine des sols

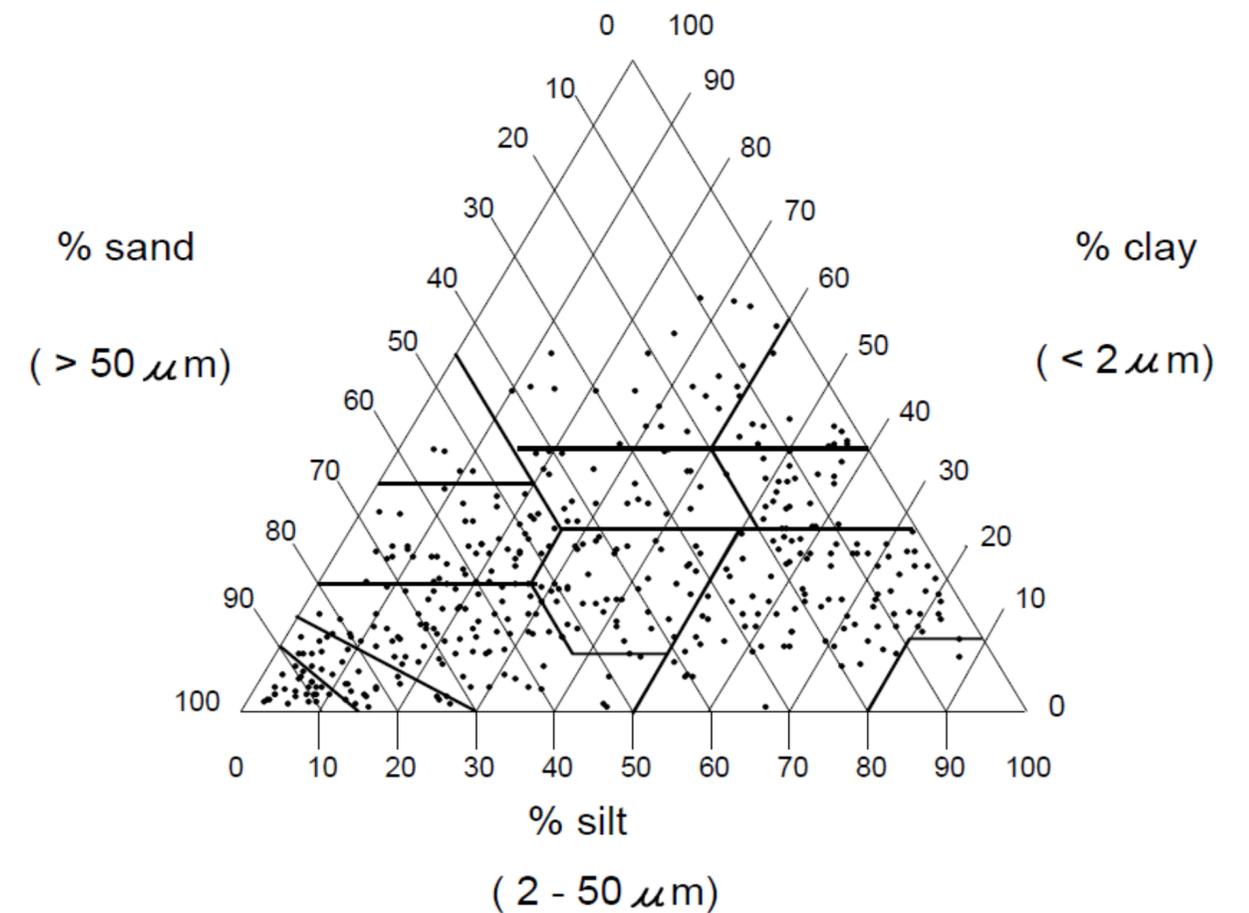
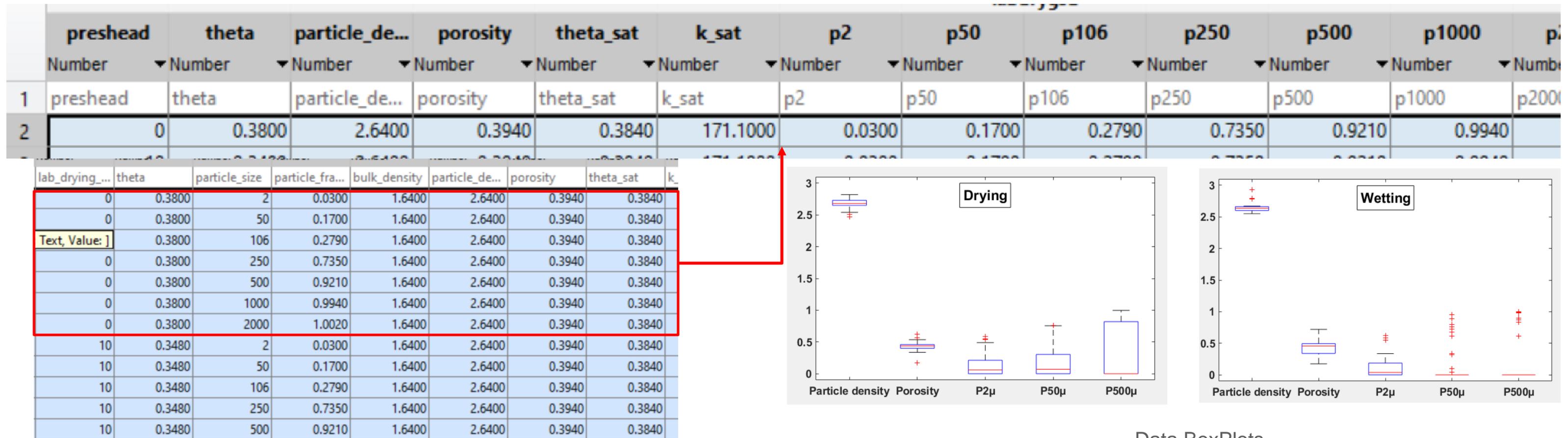


Diagramme textural ternaire USDA

Prétraitement des données

Restructuration et nettoyage des données



Data BoxPlots

- 1551 données en séchage
- 295 données en humidification
- 7 attributs significatifs : succion, θ , ρ_s , n , $P_{2\mu}$, $P_{50\mu}$, $P_{500\mu}$

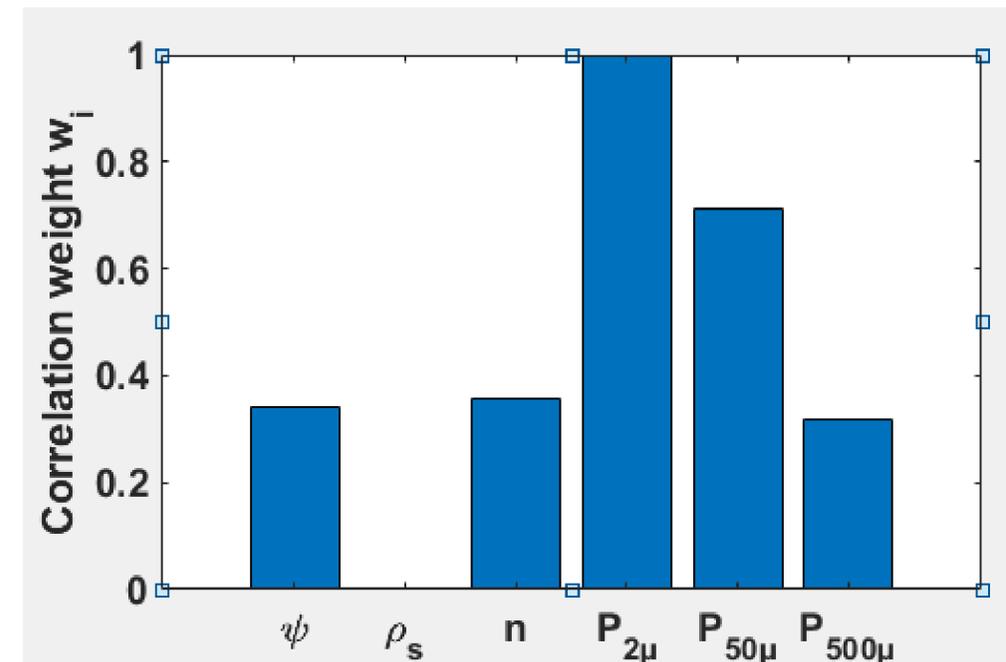
Sélection des prédicteurs

Etude des corrélations (Pearson)

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_1^n (x_j - \bar{x}_j)^2}}$$

	θ	ψ	n	ρ_s	$P_{2\mu}$	$P_{50\mu}$	$P_{500\mu}$
θ	1.000	-0.192	0.200	-0.015	0.533	0.383	-0.180
ψ	-0.192	1.000	-0.051	-0.001	0.077	-0.076	-0.129
n	0.200	-0.051	1.000	-0.161	0.084	-0.060	-0.170
ρ_s	-0.015	-0.001	-0.161	1.000	0.306	0.236	0.138
$P_{2\mu}$	0.533	0.077	0.084	0.306	1.000	0.665	-0.072
$P_{50\mu}$	0.383	-0.076	-0.060	0.236	0.665	1.000	0.371
$P_{500\mu}$	-0.180	-0.129	-0.170	0.138	-0.072	0.371	1.000

Matrice de corrélation des variables

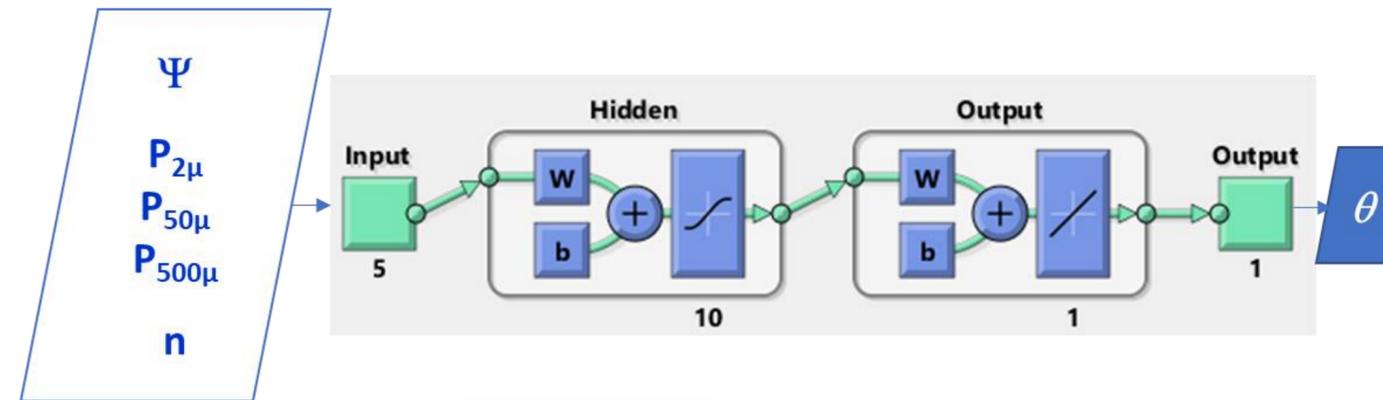


Poids de corrélation normalisé des prédicteurs avec θ

Des réseaux de neurones artificiels pour prédire la courbe de rétention

Approche point par point

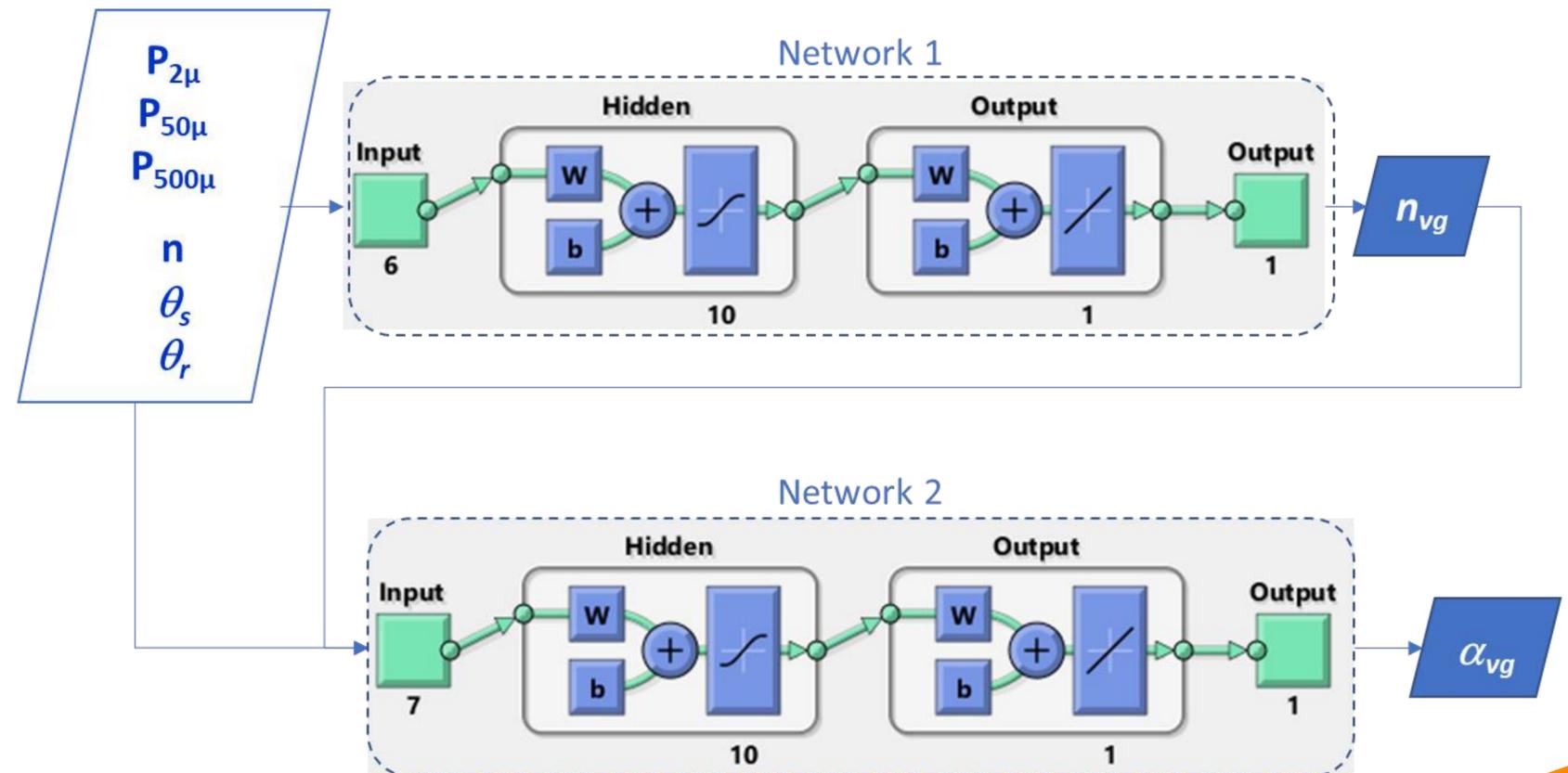
- 1159 données
- 144 sols



Approche continue (modèle de van Genuchten)

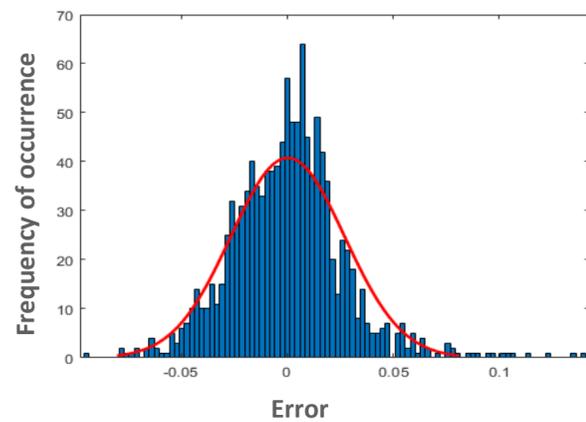
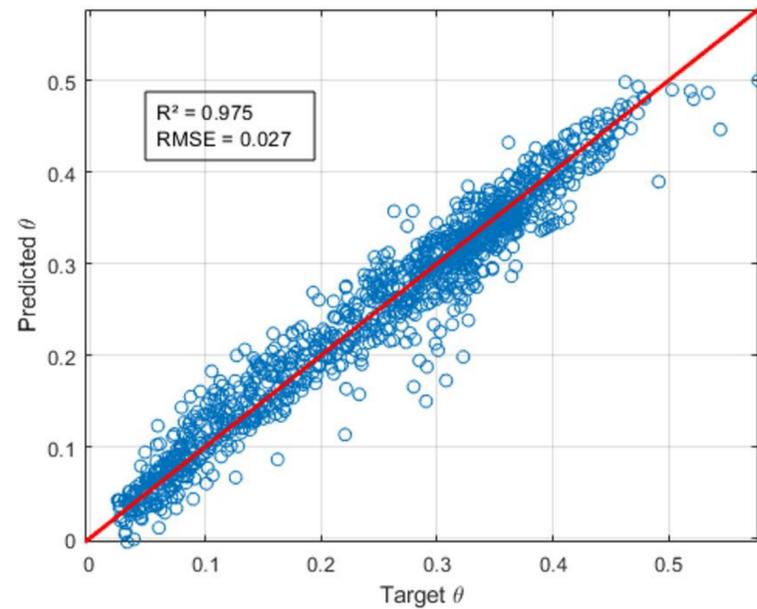
$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + (\alpha_{vg} \psi)^{n_{vg}}} \right)^{\frac{n_{vg}-1}{n_{vg}}}$$

- extraire les données par essai
- Calage des paramètres par régression (Levenberg-Marquardt)
- 103 données/sols

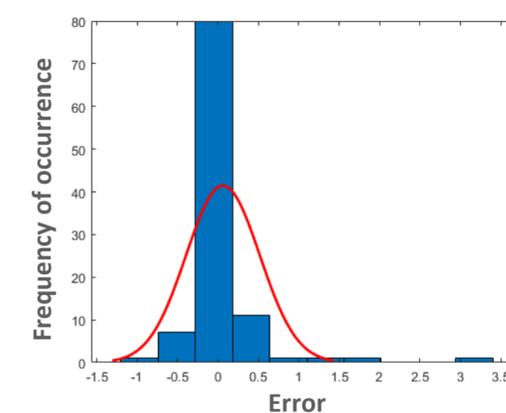
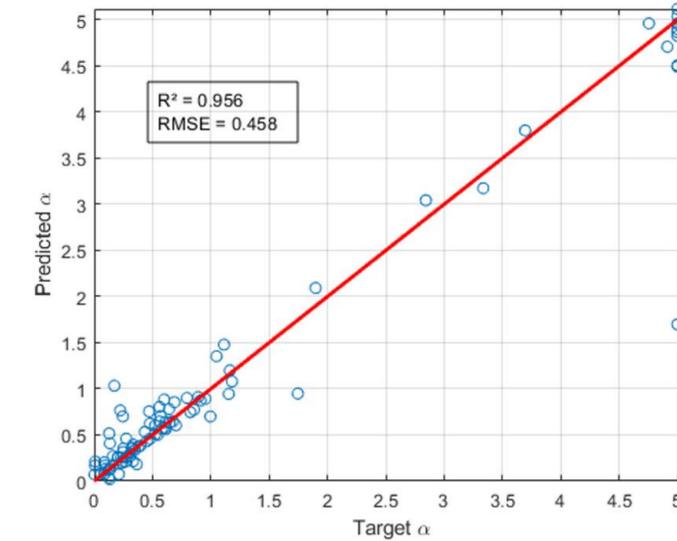
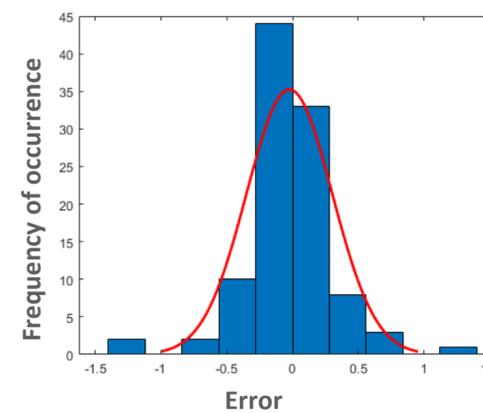
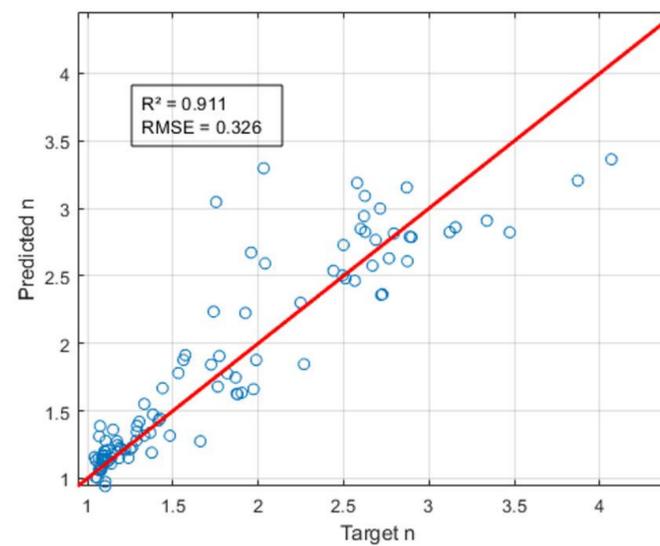


Résultats des modèles – Données d'apprentissage

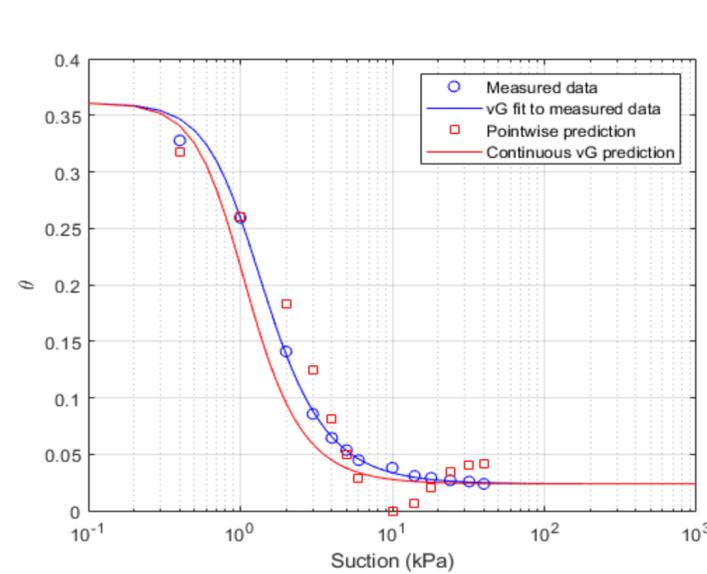
Approche point par point



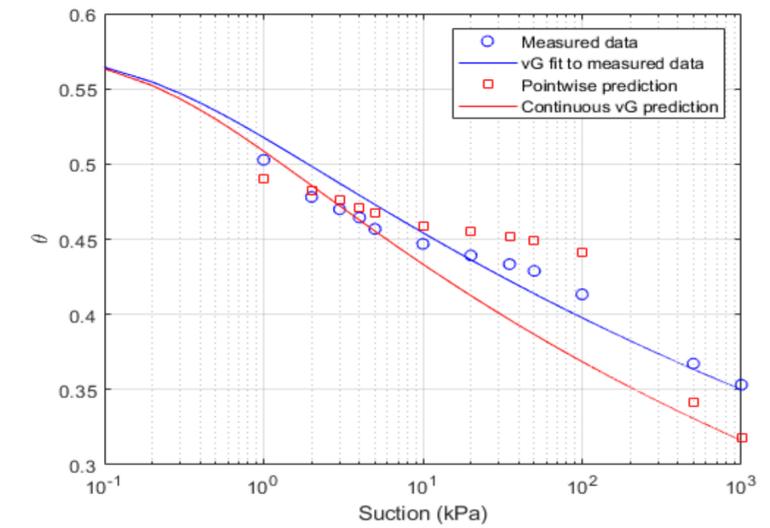
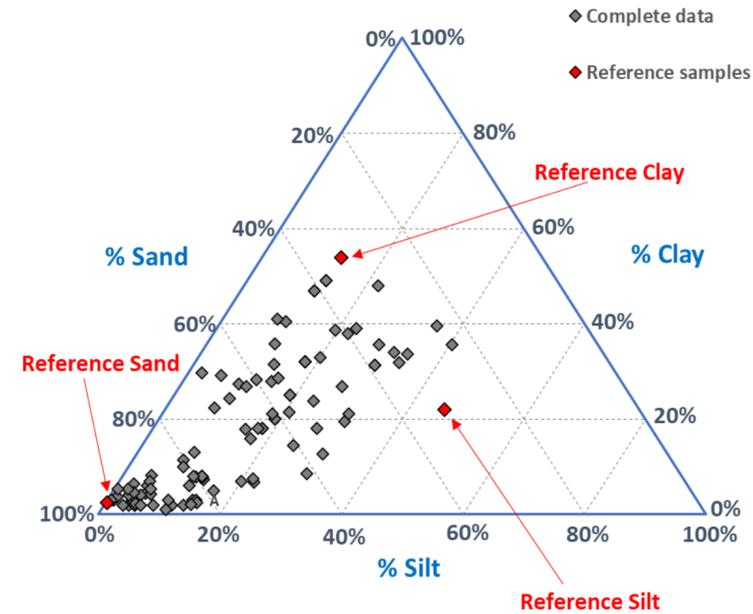
Approche continue (modèle de van Genuchten)



Résultats des modèles – Données de test

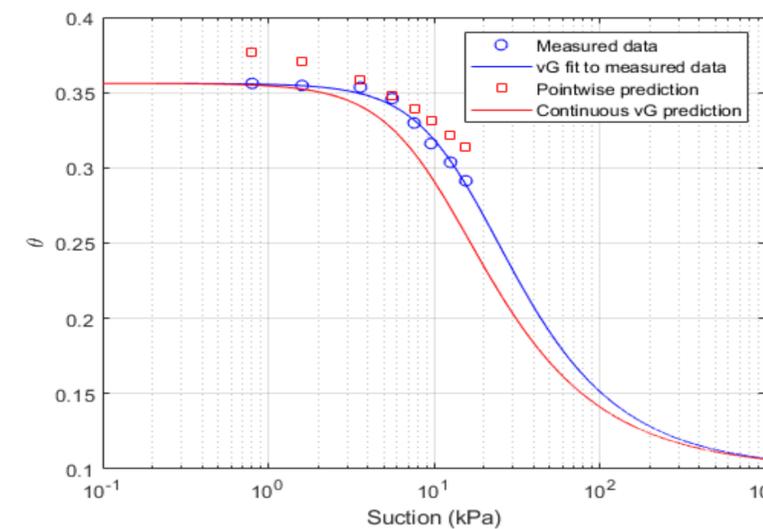


Reference Sand



Reference Clay

L'approche continue est plus pertinente malgré le nombre limité des données



Reference Silt

Éléments de synthèse

- Nettoyage & restructuration de la base de données
- L'approche continue donne de meilleurs résultats

Perspectives :

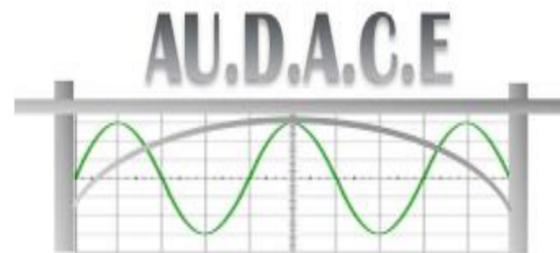
- Autres bases de données
- Incorporer l'incertitude sur les données
- Renseigner le modèle par la courbe granulométrique (Fredlund *et al.* 2002)
- Exploiter les données de conductivité hydraulique



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

3



Surveillance d'un pont-rail SNCF



QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN
GÉOTECHNIQUE
15 NOVEMBRE 2022

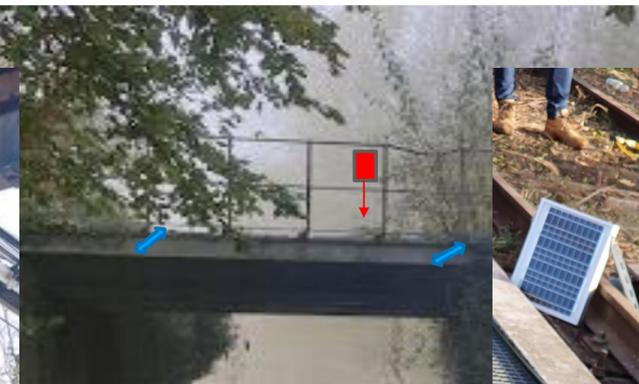
Le projet « AUto-Diagnostic Après un Choc Endommageant » (AUDACE)



- 2021-2023
- Budget total ≈ 580 k€ dont ≈ 275 k€ de subventions
- Instrumentation et suivi de 3 ouvrages en service
- Essais de chocs sur un ouvrage
- Capteurs IoT & Intelligence artificielle

Instrumentation des ponts

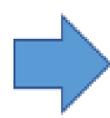
Capteurs de déplacement



Sismomètre



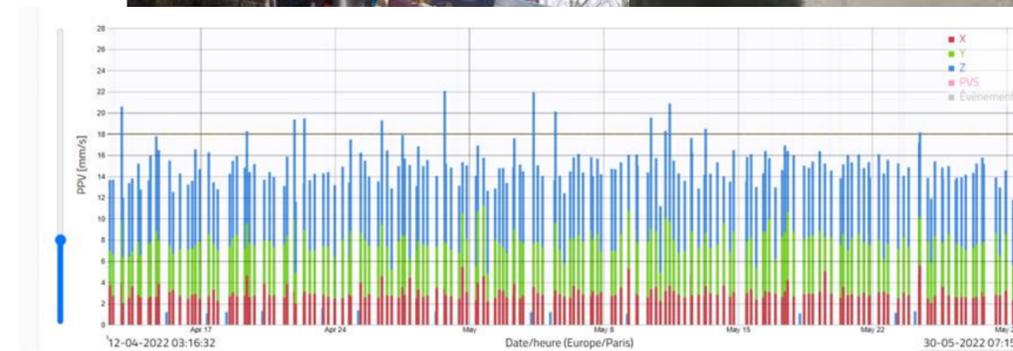
Détection d'un heurt de tablier par IoT



Analyse et caractérisation par l'IA des conséquences sur la structure



Indicateurs pour la prise de décision



Suivi vibratoire



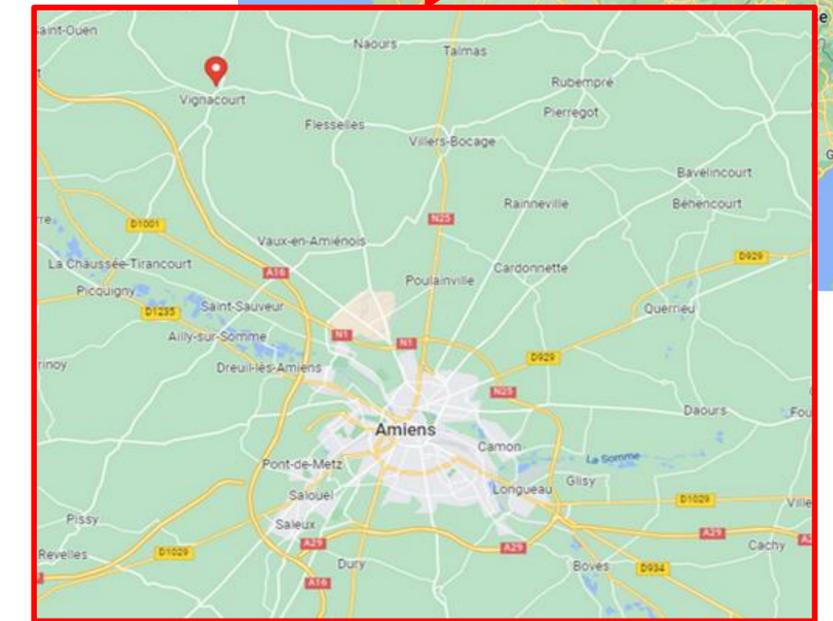
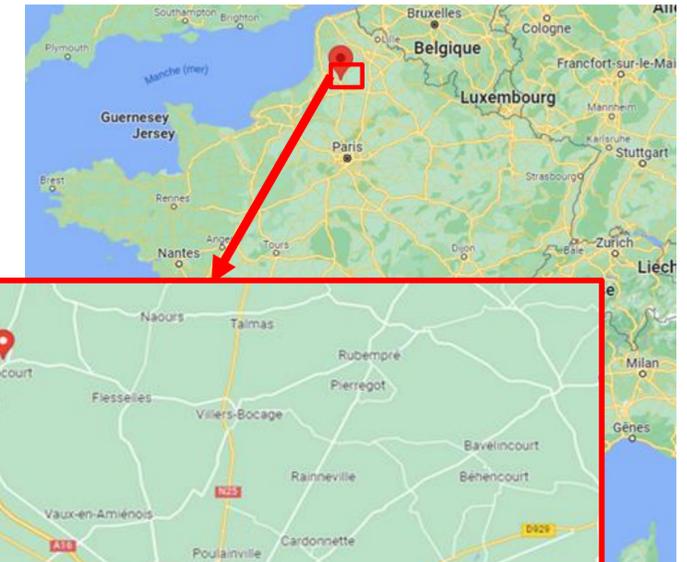
QUELQUES EXEMPLES DE MODÈLES BASÉS SUR LES DONNÉES EN GÉOTECHNIQUE
15 NOVEMBRE 2022



Essais de Chocs sur un pont

Vignacourt (80), 22 mars 2022

- Ligne désaffectée
- 3,30 m sous le pont
- Culées en maçonnerie
- Tablier en poutres métalliques jumelles
- Type d'ouvrage vulnérable aux chocs



- 19 essais avec une énergie cinétique croissante et 3 impacteurs différents

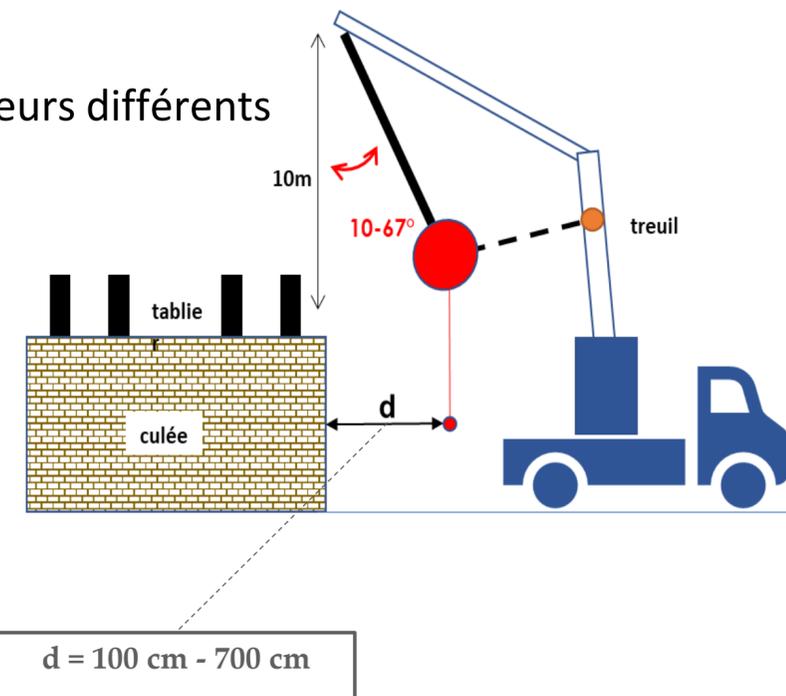
Big-bag de sable
1,4 et 1,7 t



Boule de démolition métallique
1,2 t

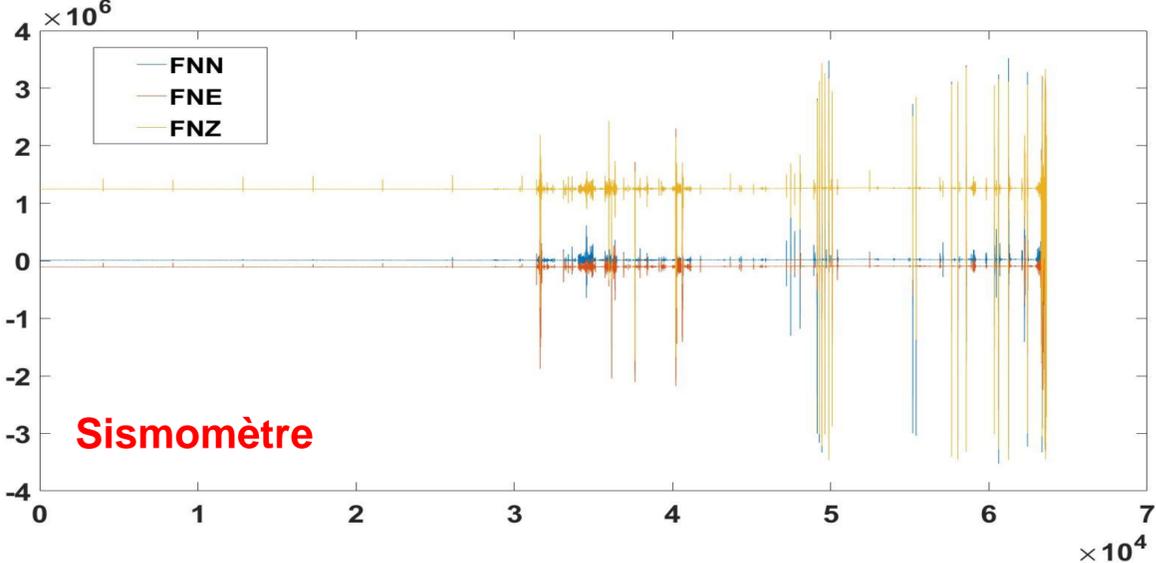
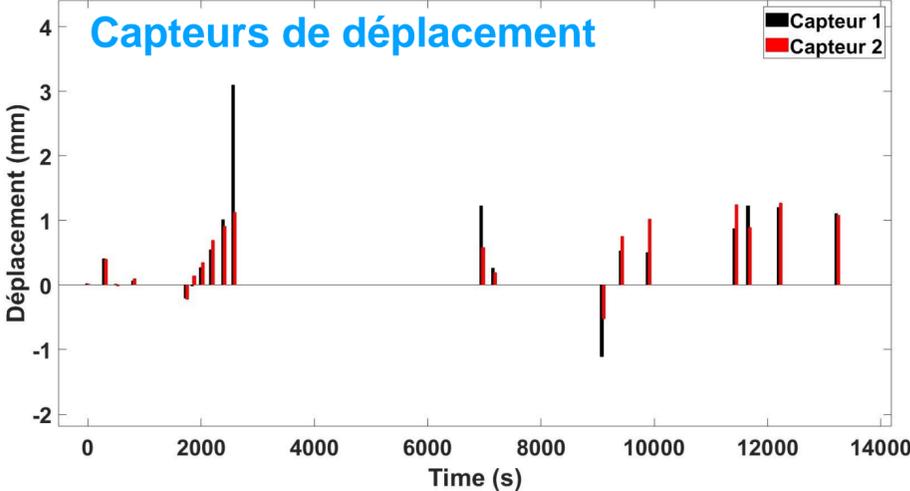
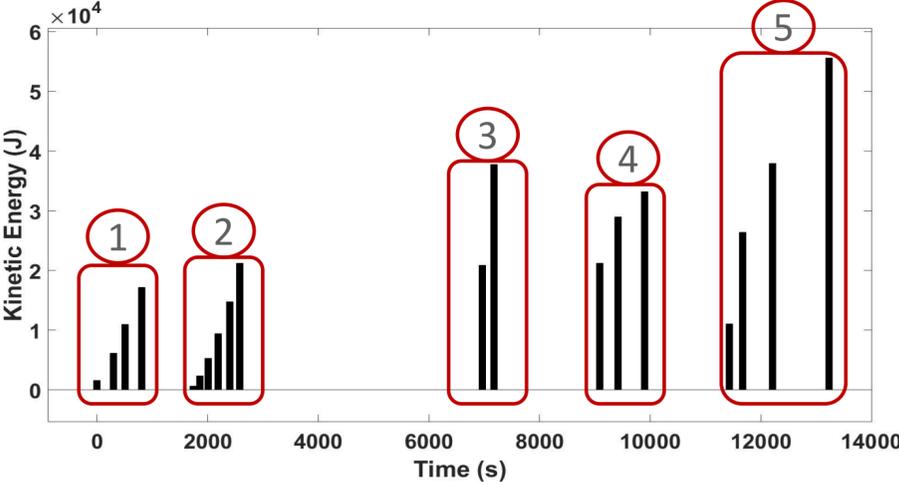


Bloc de béton
2,5 t

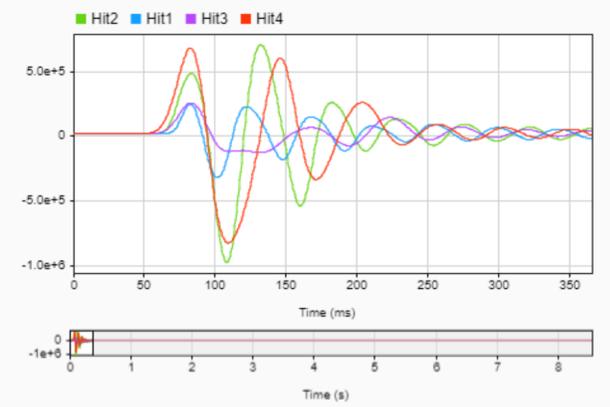


Essais de Chocs sur un pont

Analyse des résultats



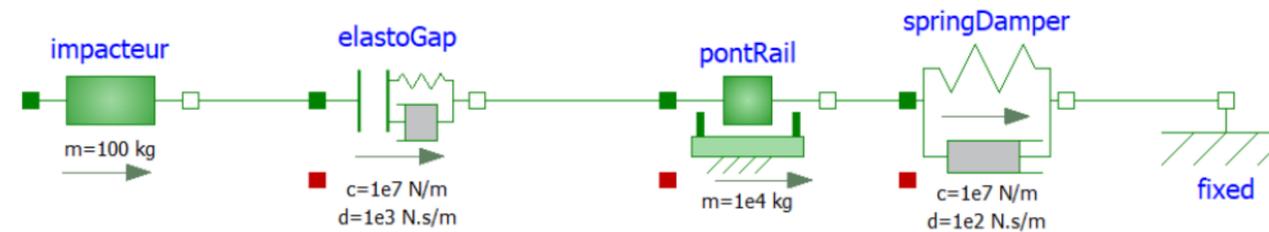
Synchronisation
Filtrage
caractérisation



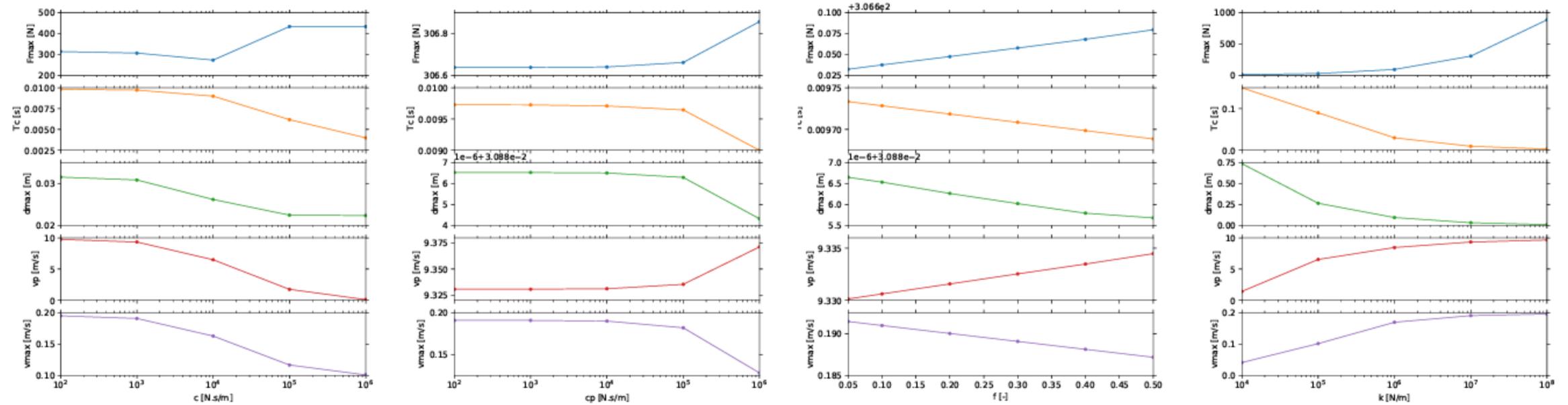
	Line color	Min value	Max value	Peak to Peak	Damping (s)	Nb of Peaks
Hit 1	Blue	-3,21	2,44	05,66	0,22	6
Hit 2	Green	-9,79	7,07	16,87	0,28	7
Hit 3	Purple	-1,27	2,58	03,85	0,23	6
Hit 4	Red	-8,27	6,81	15,09	0,26	6

Modèle numérique

Collaboration avec D. Brizard pour un modèle dynamique



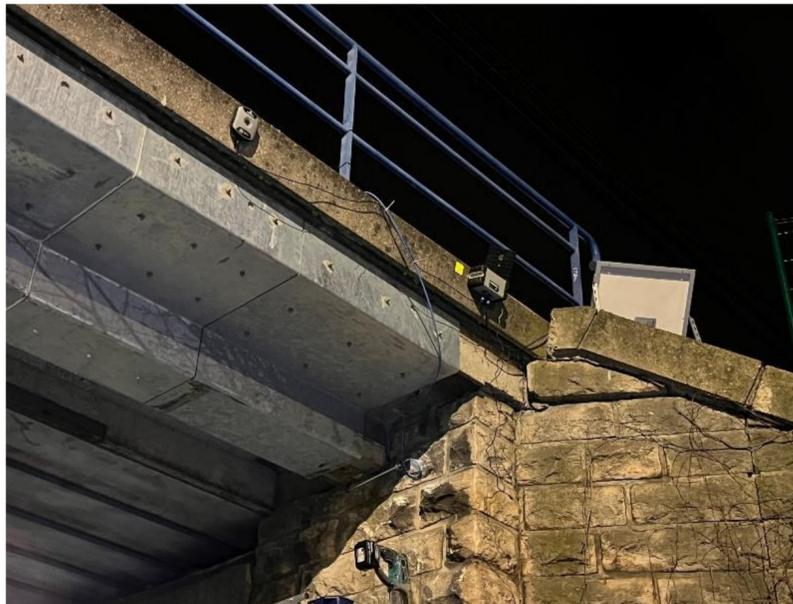
- ▶ Etude paramétrique
- ▶ Paramètres influents
- ▶ Validation sur les essais de chocs provoqués (en cours)
- ▶ Source de données supplémentaire



Instrumentation de ponts en service

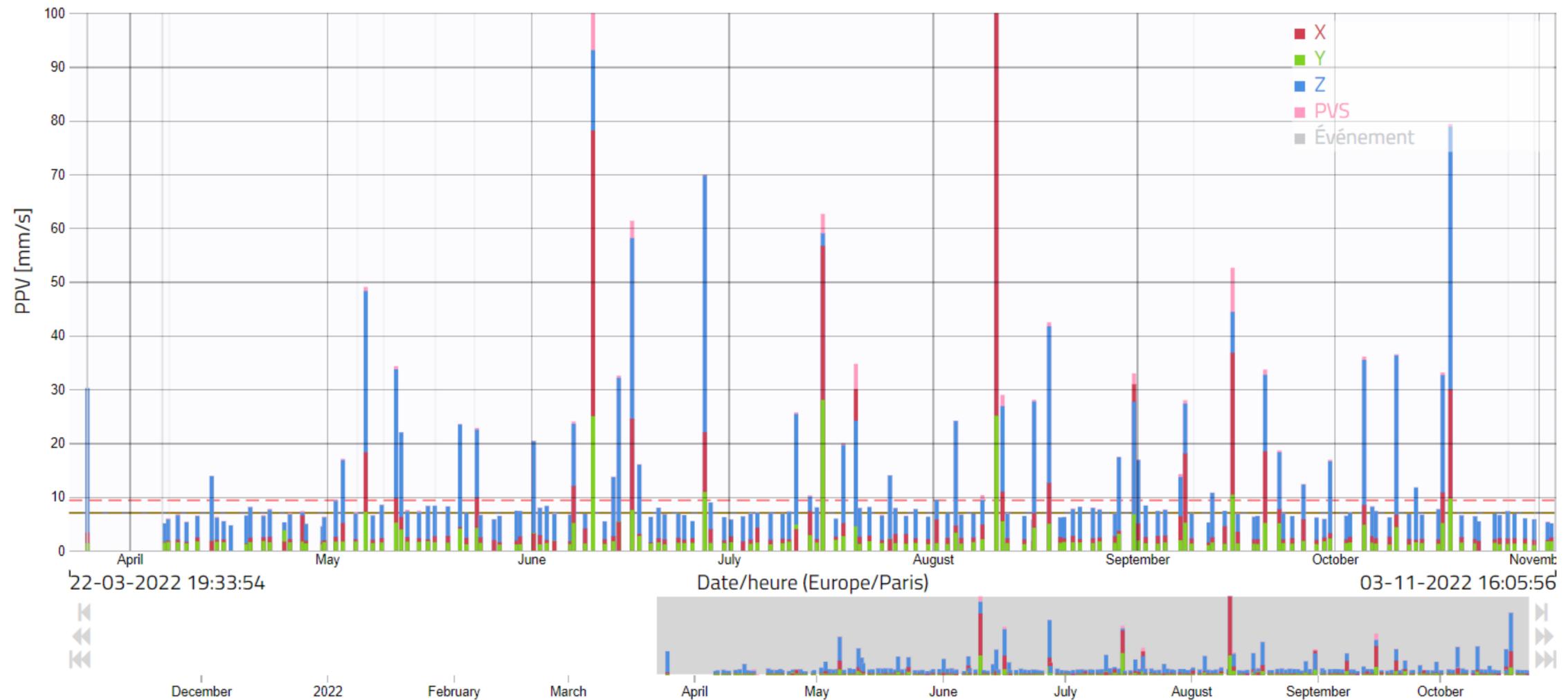
Mars-Juin 2022

- Ouvrages sujets aux chocs
- Vulnérabilité
- Capteur de déplacement
- Sismomètre
- Piège photo
- Capteurs IoT



Extrait des données

Définition des seuils d'alerte



Éléments de synthèse

- Développement d'un outil de surveillance des ponts-rails
- Essais de chocs provoqués pour enrichir la base de données
- 3 ponts en service instrumentés
- Modélisation numérique des chocs
- Pré-traitement des données en cours

Perspectives :

- Validation du modèle numérique
- Entrainement des algorithmes pour détecter les chocs et évaluer les dégâts
- Déploiement avec les capteurs IoT



cfmms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Merci de votre attention



Adel ABDALLAH

Maître de Conférences / Associate Professor

ENSG - LEMTA UMR 7563 - Université de Lorraine

+33 3 72 74 43 44 (Bureau/Office) - +33 6 83 10 22 79 (Mobile)

adel.abdallah@univ-lorraine.fr

2, rue du Doyen Marcel Roubault • BP 10162

54505 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex

France

