

# **Intelligence Artificielle en Géotechnique**

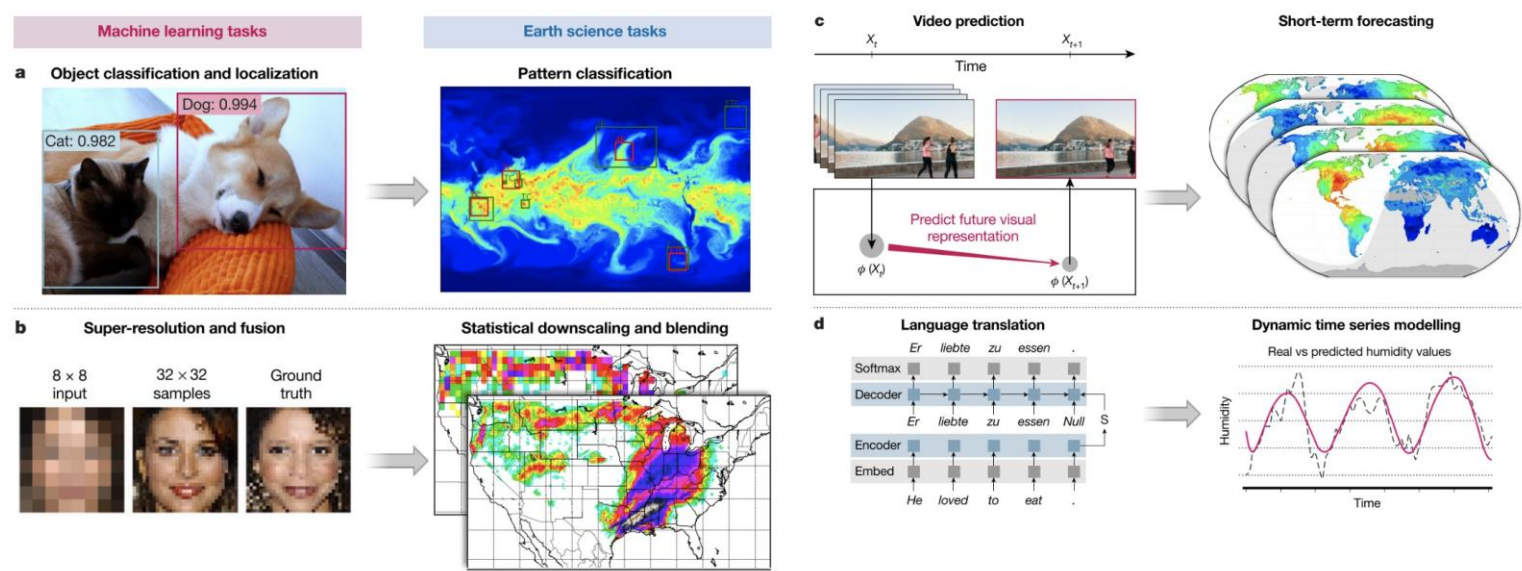
*Jean-Michel PEREIRA, Lina-María GUAYACAN-CARRILLO*





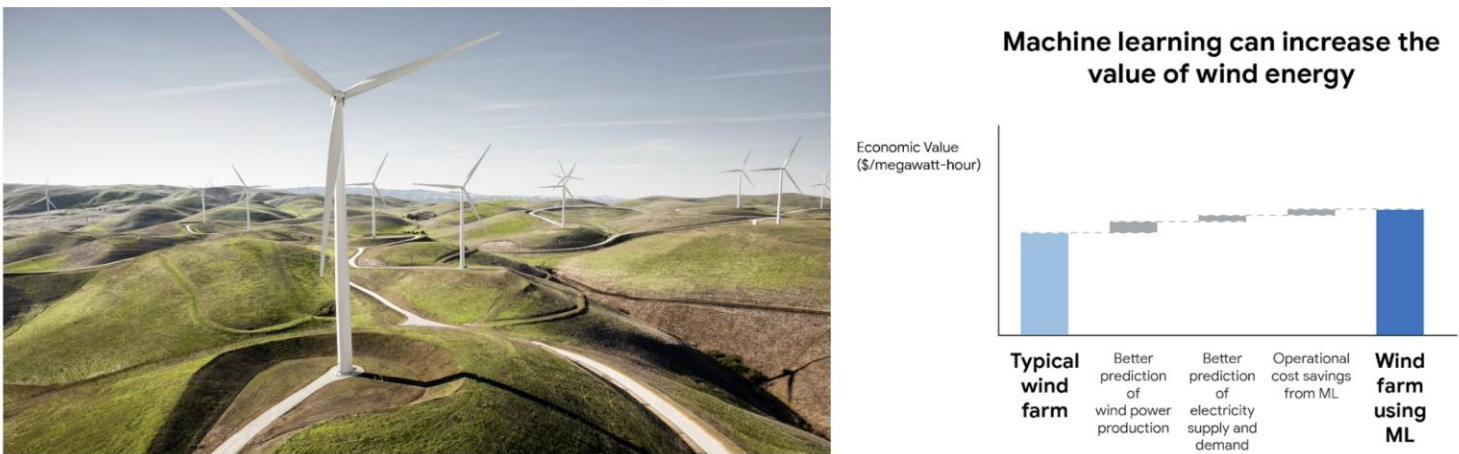
# Intelligence Artificielle et Systèmes Complexes

## Application des outils existants aux géosciences ?



Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B., Jung M., Denzler J., Carvalhais N. & Prabhat. 2019. Deep Learning and Process Understanding for Data-Driven Earth System Science. Nature 566 (7743): 195–204.  
J.M. Pereira, Solscope 2019, 26 juin 2019

## Exemple d'application



+20% de valeur  
(dont prédiction de puissance 36h en avance)

https://www.blog.google/technology/ai/machine-learning-can-boost-value-wind-energy/  
J.M. Pereira, Solscope 2019, 26 juin 2019

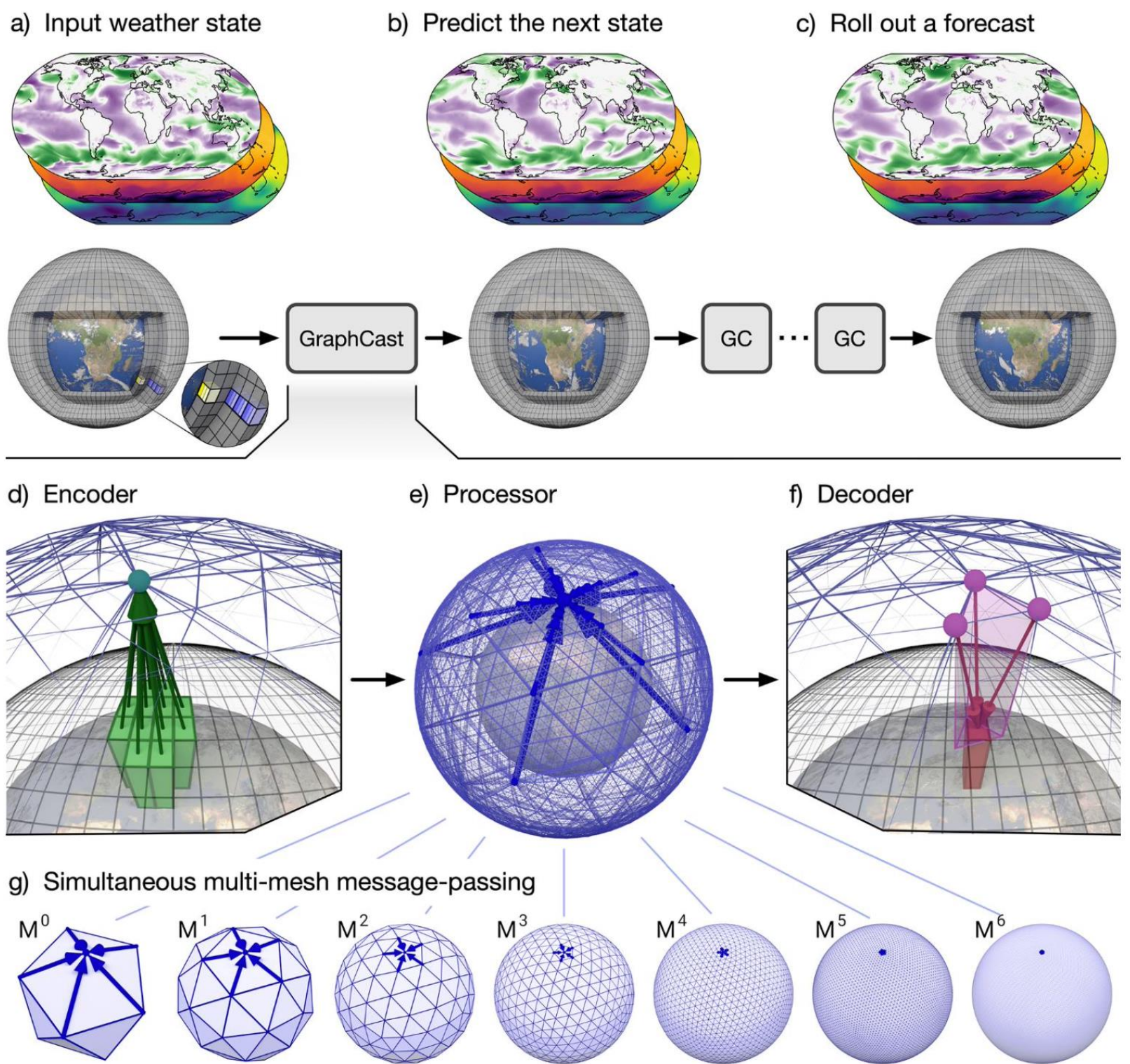
Science

RESEARCH ARTICLE  
Check for updates

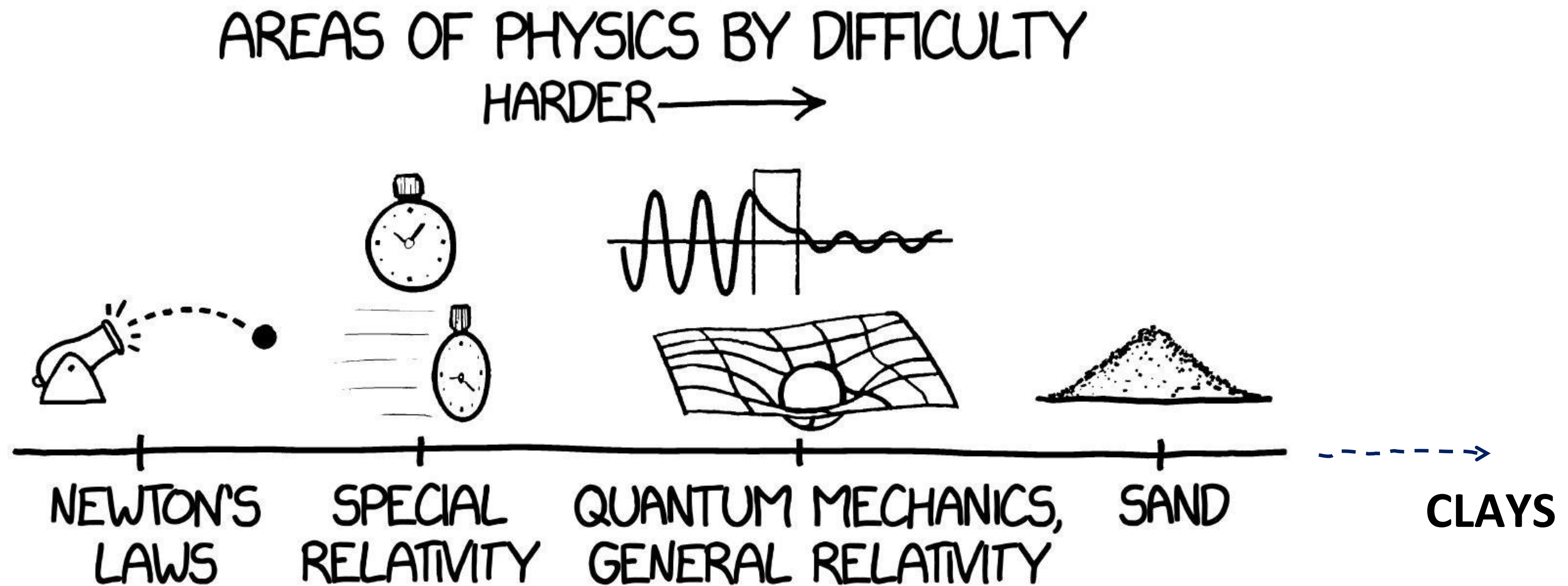
Cite as: R. Lam *et al.*, *Science* 10.1126/science.adi2336 (2023).

## Learning skillful medium-range global weather forecasting

Remi Lam<sup>1†</sup>, Alvaro Sanchez-Gonzalez<sup>1†</sup>, Matthew Willson<sup>1†</sup>, Peter Wirnsberger<sup>1†</sup>, Meire Fortunato<sup>1†</sup>, Ferran Alet<sup>1†</sup>, Suman Ravuri<sup>1†</sup>, Timo Ewalds<sup>1</sup>, Zach Eaton-Rosen<sup>1</sup>, Weihua Hu<sup>1</sup>, Alexander Meroze<sup>2</sup>, Stephan Hoyer<sup>2</sup>, George Holland<sup>1</sup>, Oriol Vinyals<sup>1</sup>, Jacklynn Stott<sup>1</sup>, Alexander Pritzel<sup>1</sup>, Shakir Mohamed<sup>1\*</sup>, Peter Battaglia<sup>1\*</sup>







(Adapté de Randall Munroe)  
<https://www.nytimes.com/>



# Intelligence Artificielle en géotechnique

## Dimensionnement thermique de pieux échangeurs de chaleur



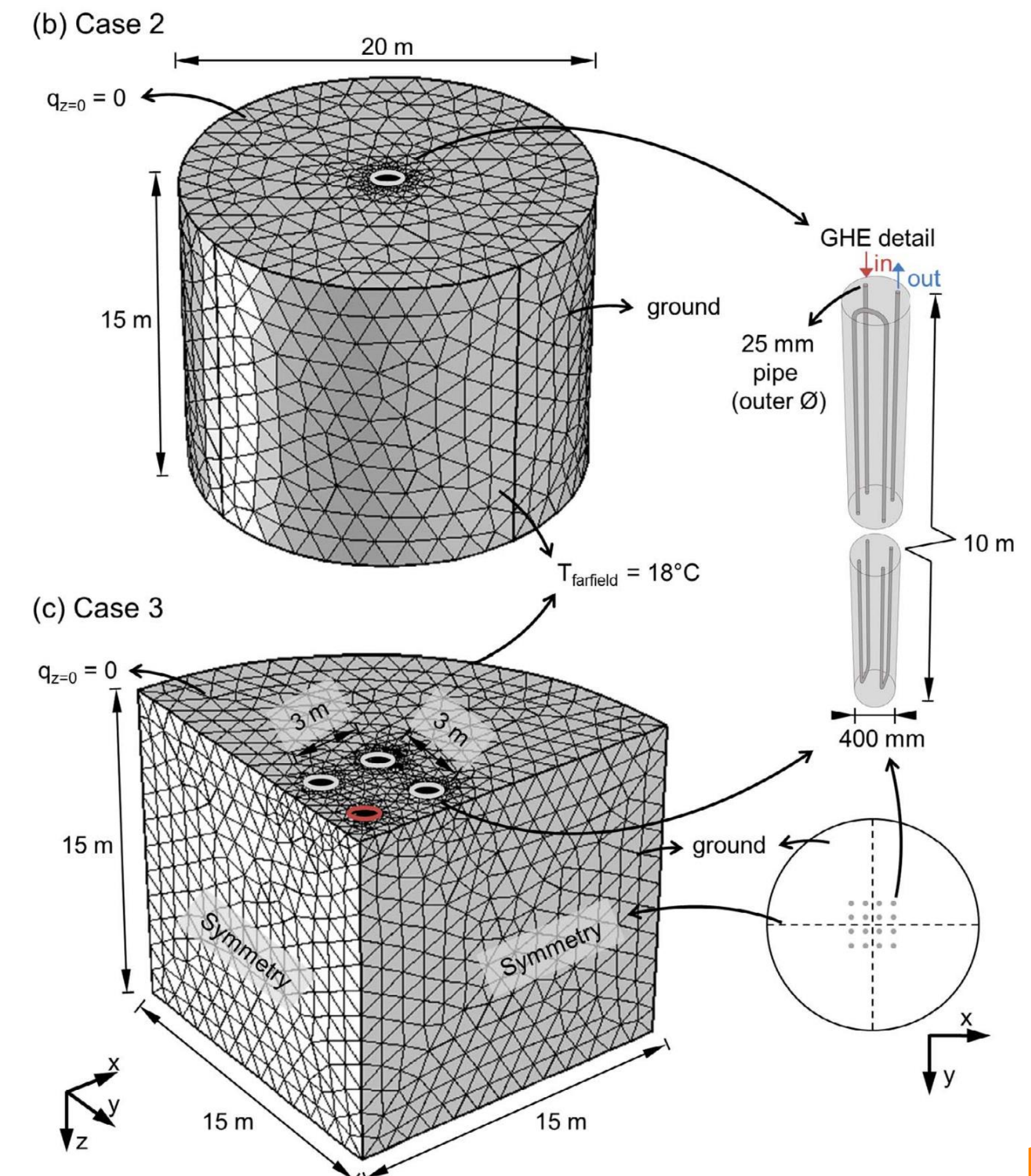
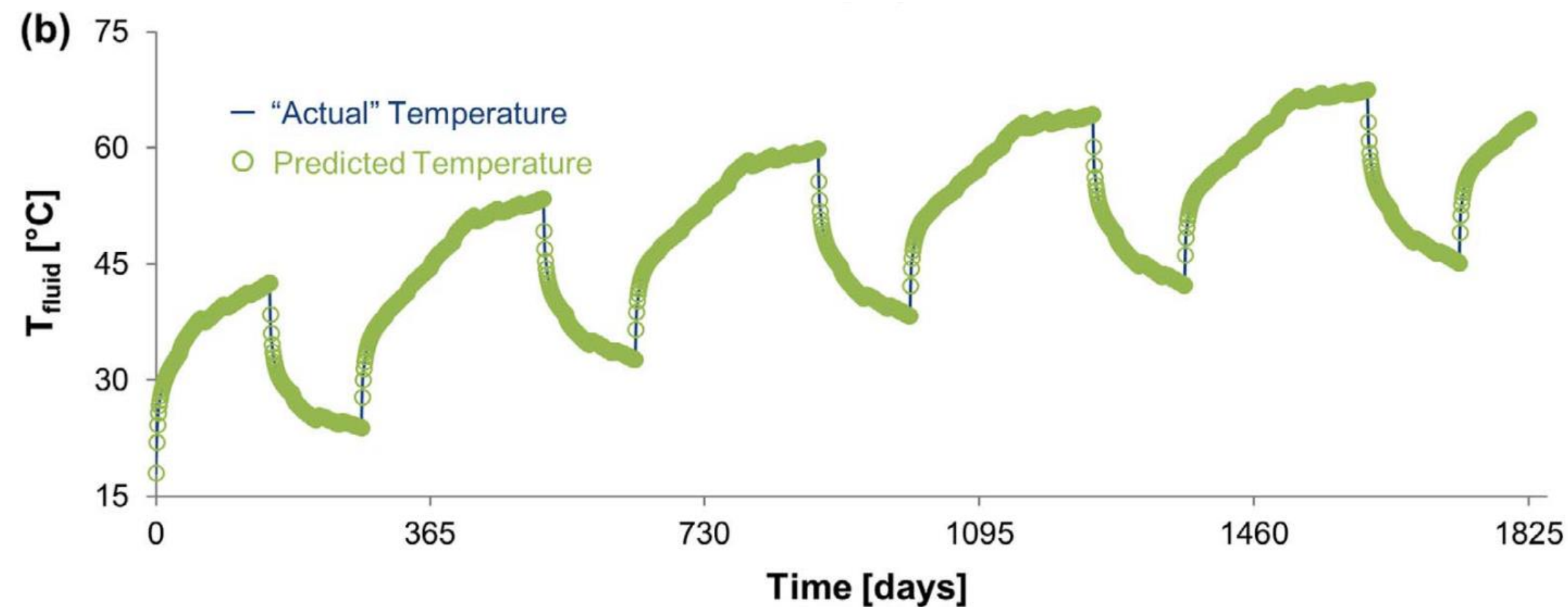
Research Paper

### A machine learning approach to energy pile design

Nikolas Makasis<sup>a</sup>, Guillermo A. Narsilio<sup>a,\*</sup>, Asal Bidarmaghz<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Parkville, Australia

<sup>b</sup> Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom





# Et la physique dans tout ça ? *Les PINN - réseaux de neurones basés sur la physique*

Landslides

DOI 10.1007/s10346-023-02072-0

Received: 30 August 2022

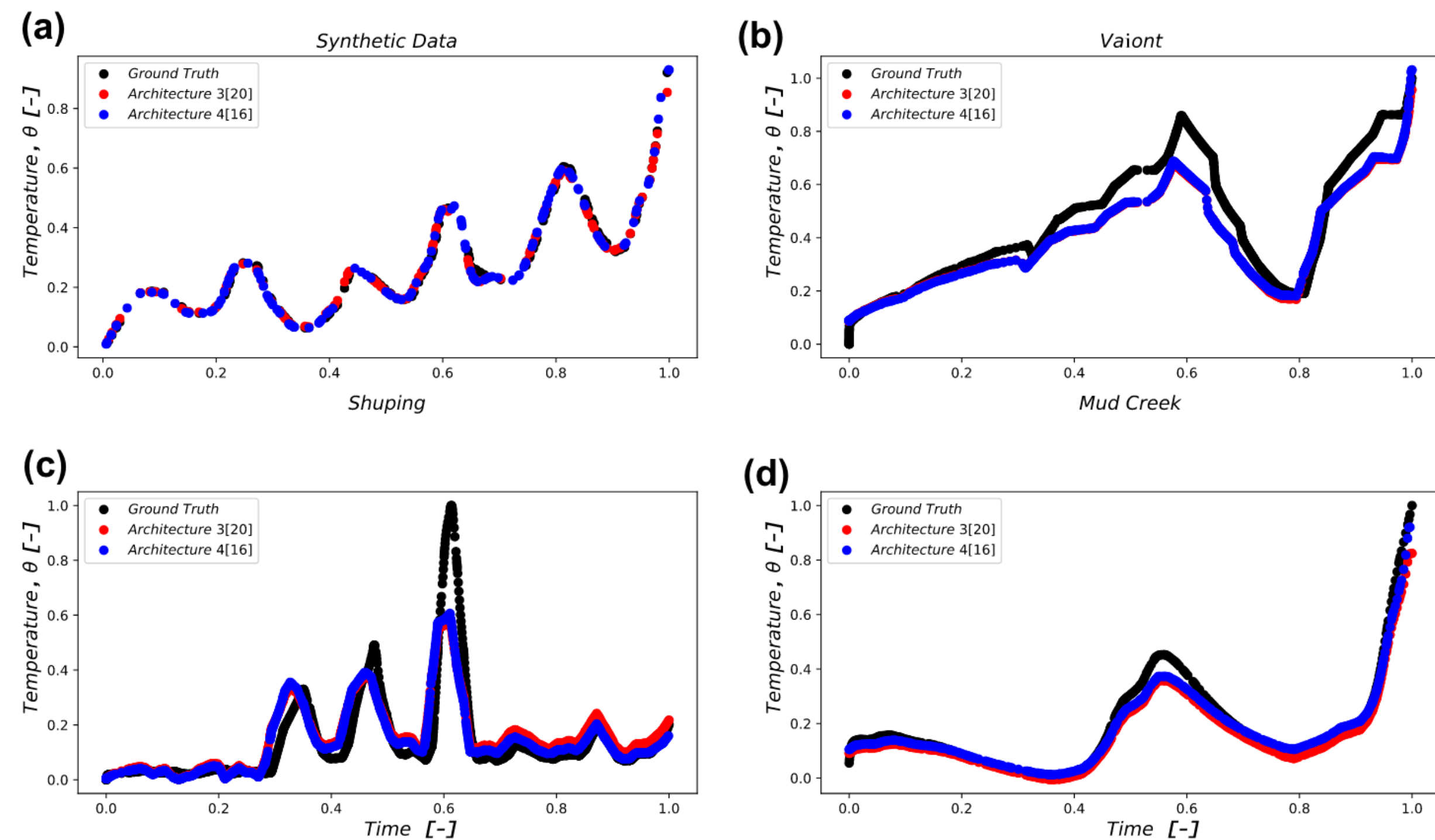
Accepted: 12 April 2023

© The Author(s) 2023

Ahmad Moeineddin  · Carolina Seguí · Stephan Dueber · Raúl Fuentes

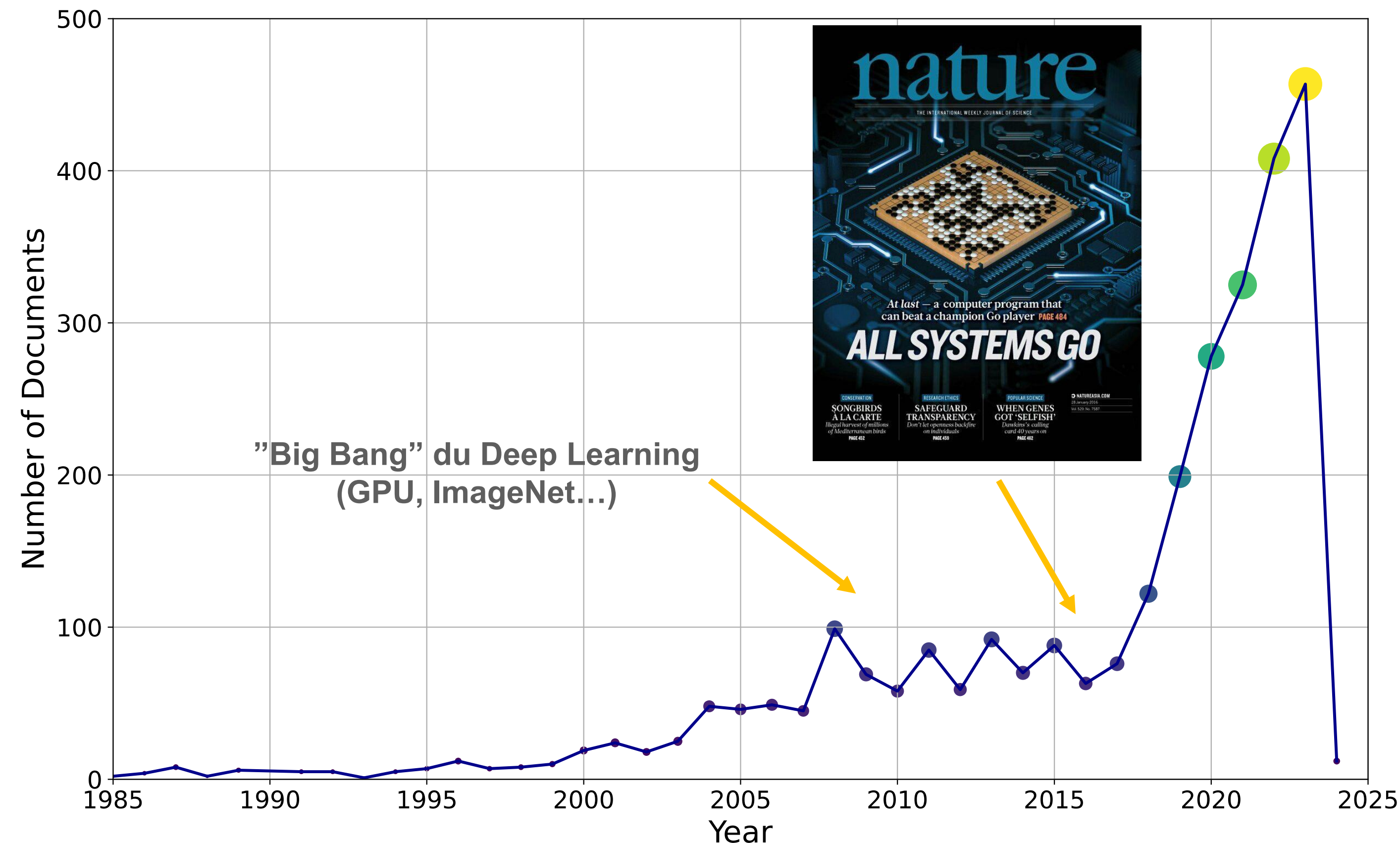
## Physics-informed neural networks applied to catastrophic creeping landslides

Prévision de la température  
au niveau de la bande de cisaillement



# IA et géotechnique dans la littérature scientifique

## *Pas si récent mais une croissance très rapide*



((TITLE-ABS-KEY ( ( ""soil mechanic\*"" OR geotechnic\* OR geomechanic\* ) AND (""machine learning"" OR ""artificial intelligence"" OR ""AI"" OR ""deep learning"" OR ""neural network\*"" OR ""big data"" ) )))

Requête Scopus, 05/12/2023

## Ce qui a changé ? Les moyens

- Des algorithmes plus évolués
- Une puissance de calcul plus grande
- Des données plus nombreuses

## Et en géotechnique ?

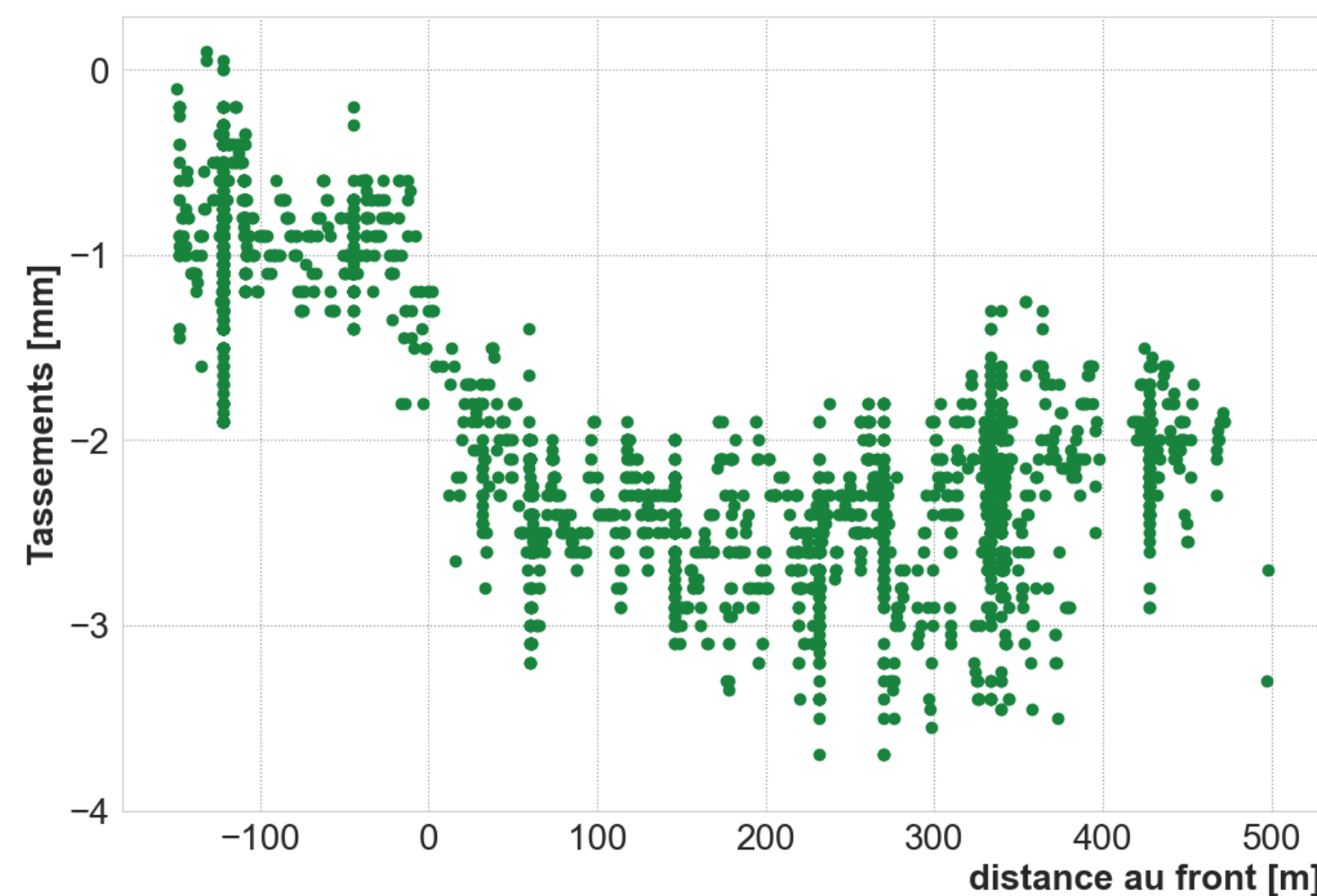
- Dimensionnement des ouvrages plus rapide et moins coûteux
- Apprendre de la donnée : enrichir les approches empiriques, systèmes d'alerte, maintenance prédictive, etc.
- Prendre en compte de nouveaux phénomènes, tester différents scénarios, etc. (adaptation au changement climatique)



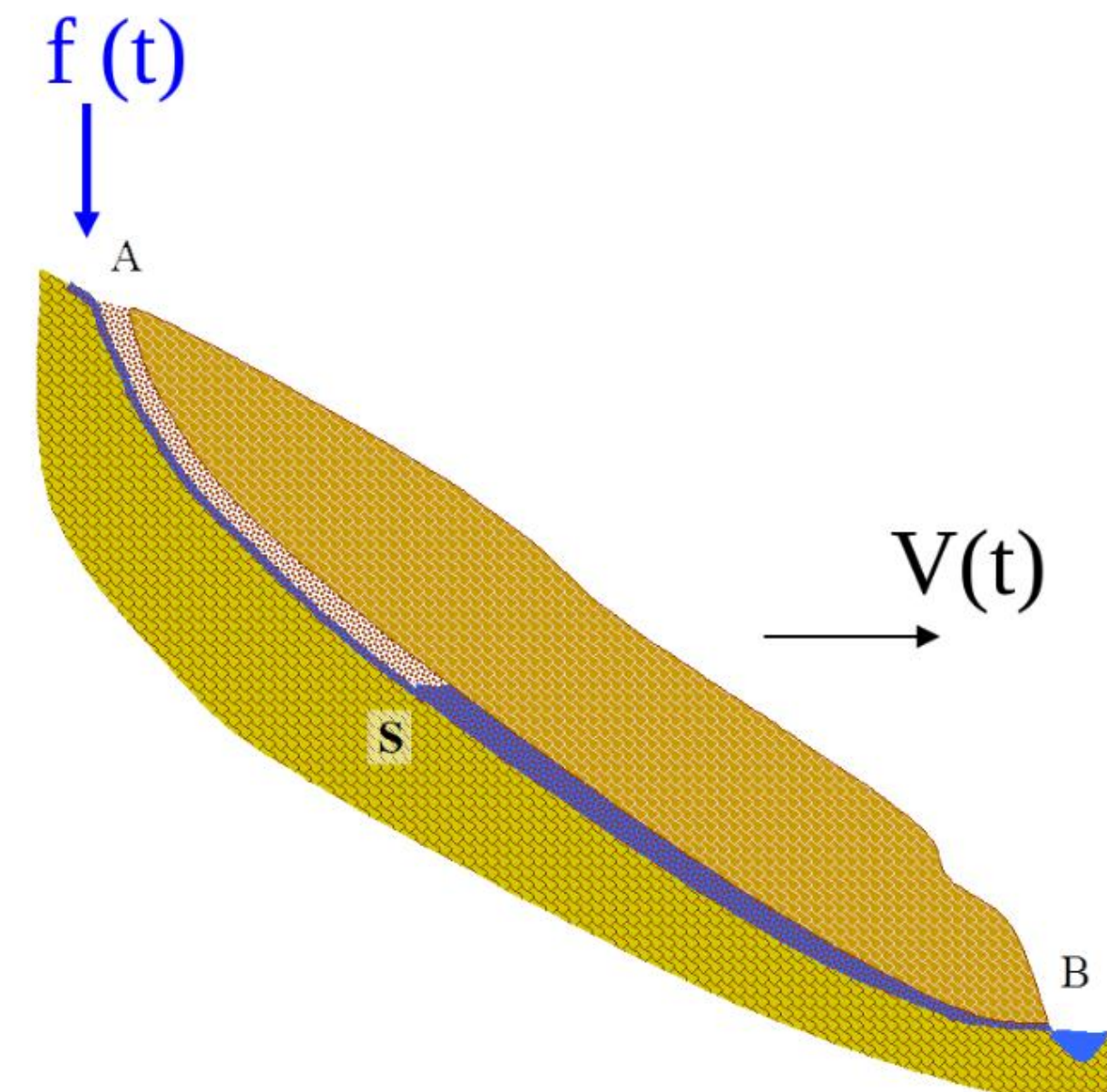
# La Donnée *Variée et de qualité variable*

- **Données réelles**  
un travail considérable de nettoyage  
et de préparation nécessaire
- **Données synthétiques**  
conformes (généralement) mais  
limitées au modèle choisi

Progression du tassement  
avec l'avancement du tunnelier



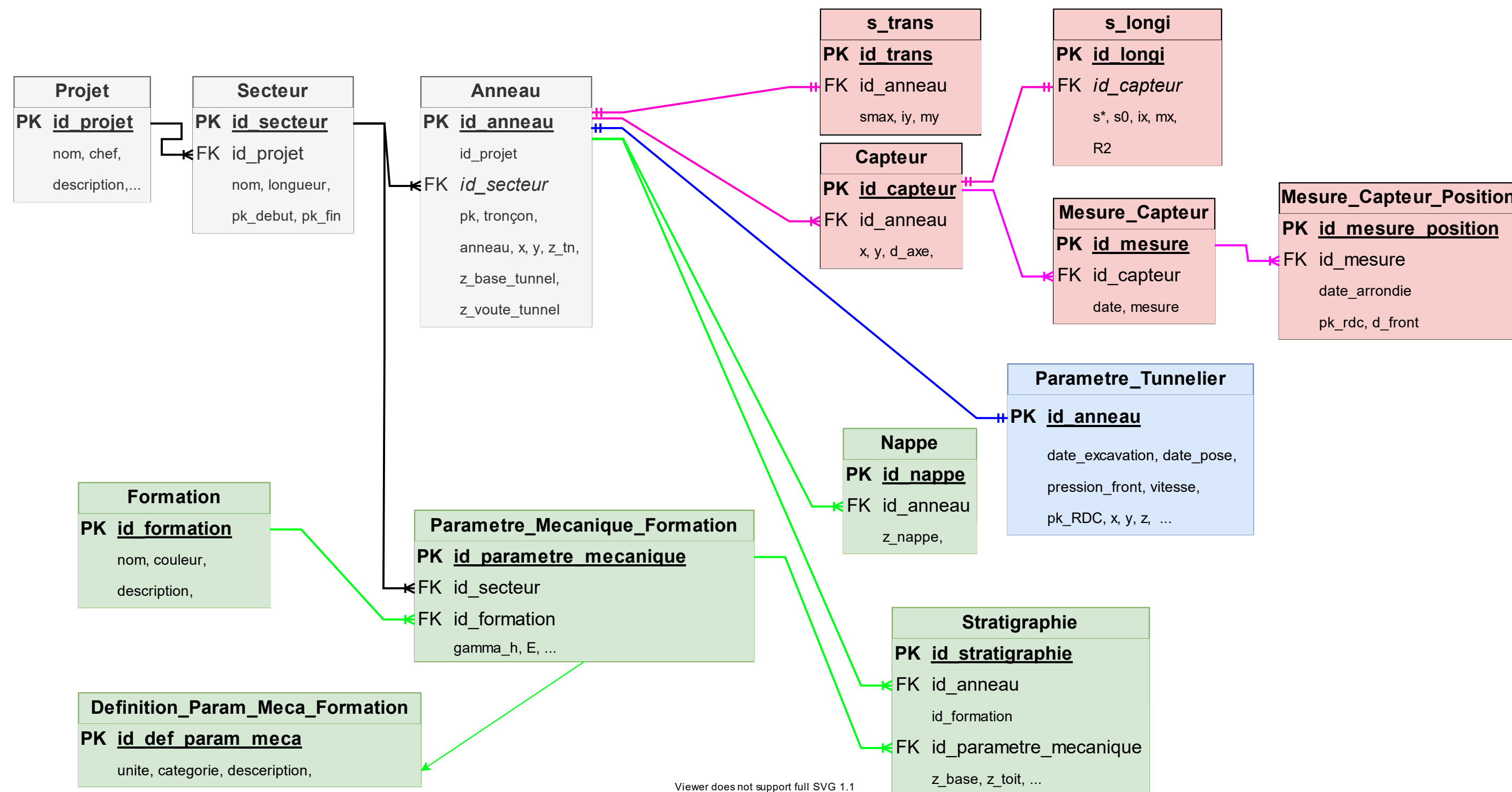
Thèse T. Richa (2023), Ecole des Ponts – Setec-Terrasol



Thèse H. Mas-Mézéran (2024),  
figure adaptée de (Pouya et al., 2007)



# La Donnée : préparation et valorisation



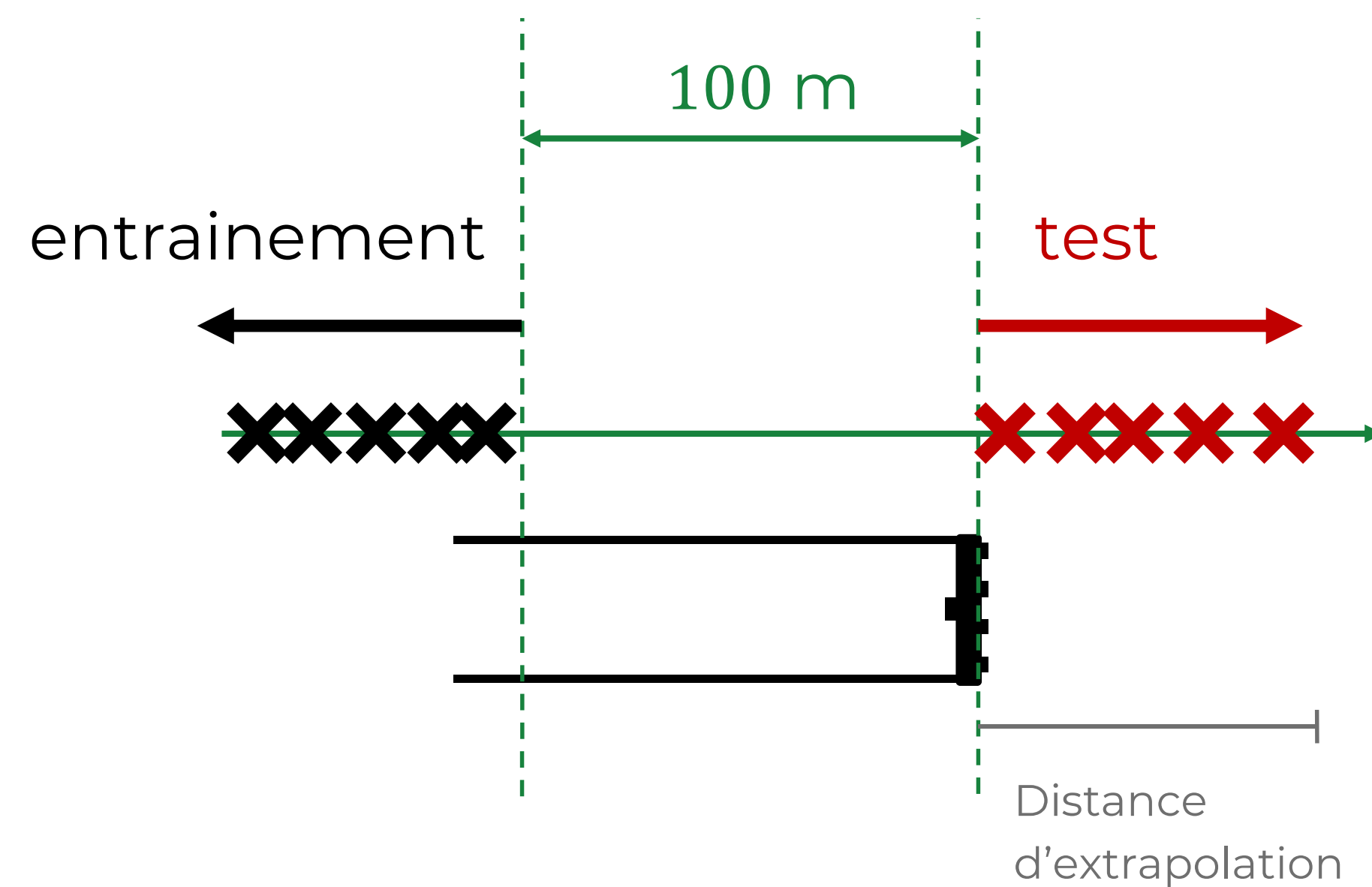
- Nettoyage
- Accessibilité (format, rapidité...)
- Préparation (réduction de dimension)

Thèse T. Richa (2023), Ecole des Ponts – Setec-Terrasol

# Apprentissage basé sur la donnée *Creusement de tunnels au TBM*

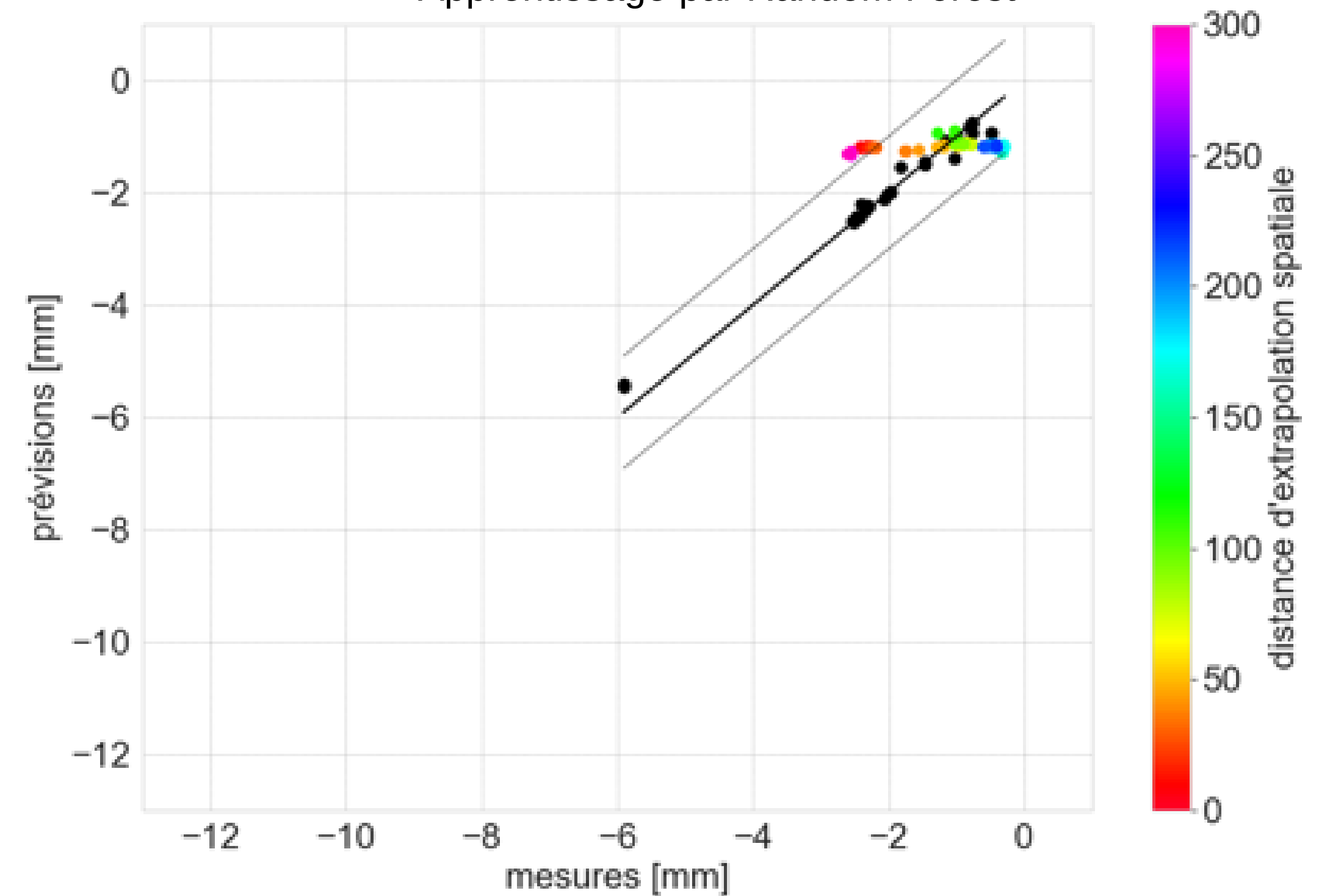
Thèse T. Richa (2023)

Preuve de concept :  
prévision du tassement maximal



5 mois de creusement (et d'apprentissage) – 500 m

Apprentissage par Random Forest



150 m de prévision acceptable  
(300 m après 8 mois)

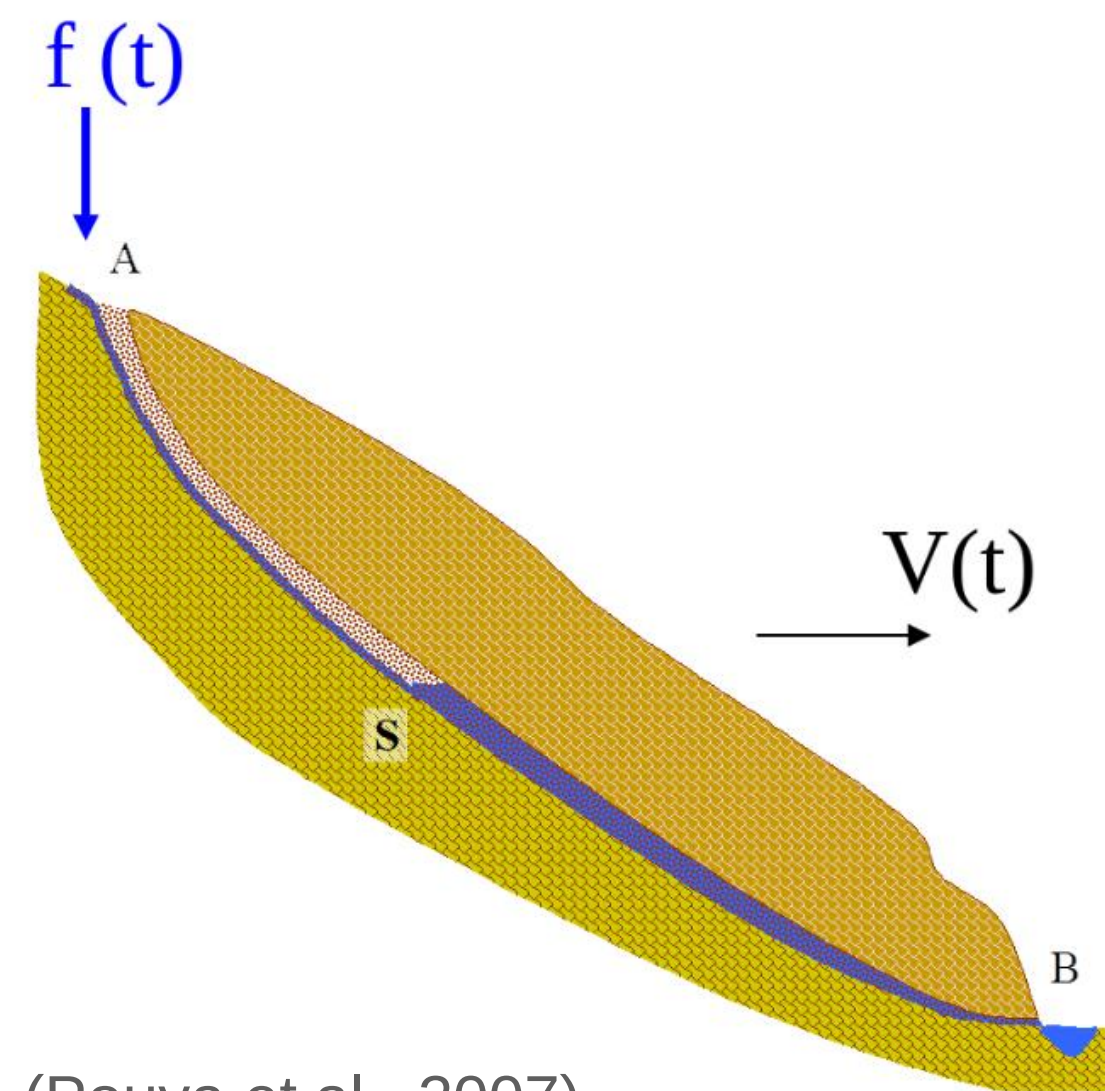


# Apprentissage basé sur la physique

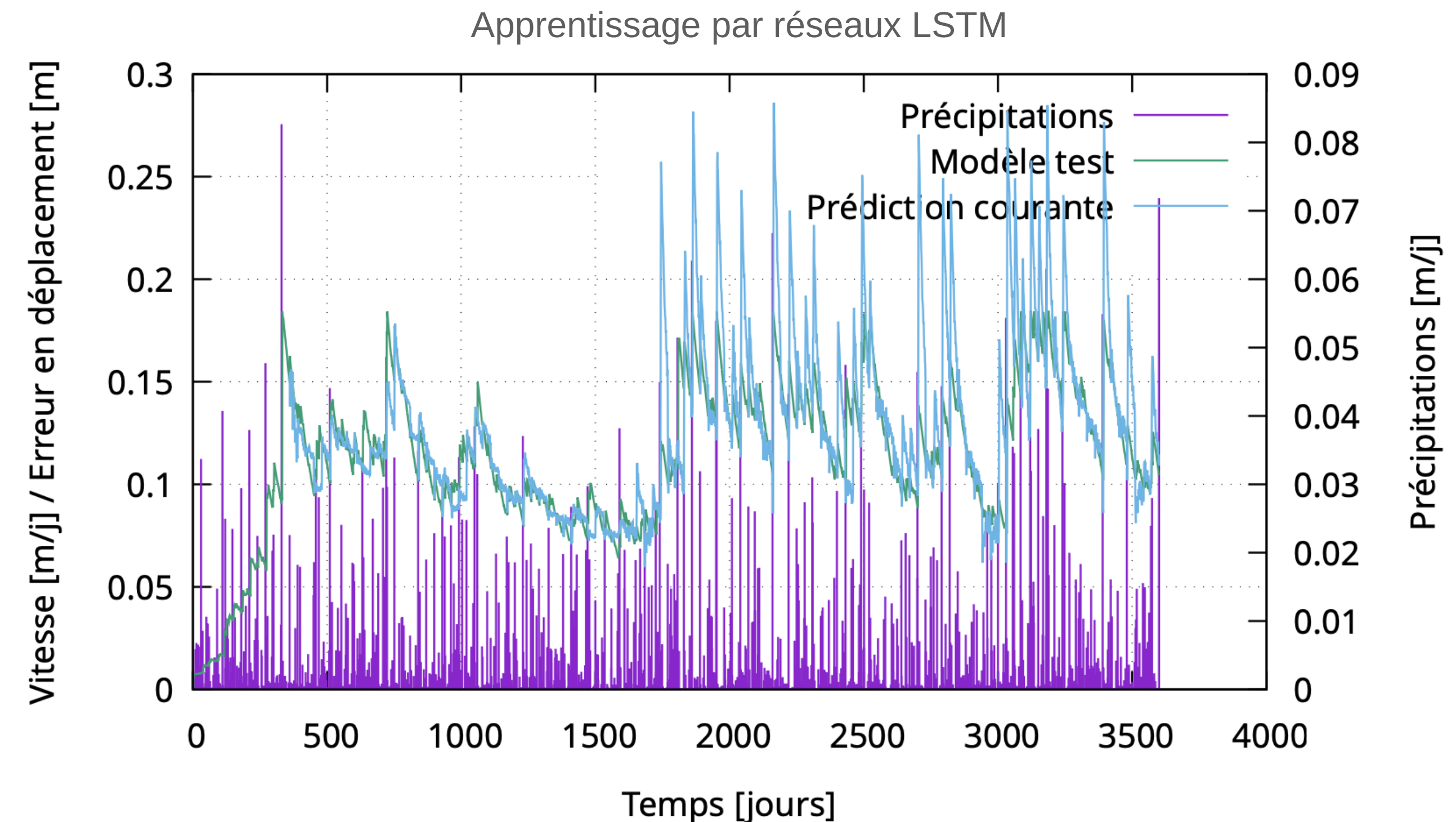
## *Glissement de La Clapière*

Thèse H. Mas-Mézéran (2024)

Evolution d'un glissement  
à partir de l'historique des déplacements en surface



(Pouya et al., 2007)



Prévision de la vitesse de glissement sur 15 jours  
à partir de l'historique sur 180 jours



# Fiabilité des modèles sachants



© MX3D



***Si vous ne savez pas ce que vous recherchez ... vous ne  
trouverez probablement pas beaucoup de valeur.***

**R. Glossop**

*(traduit de l'anglais au français)*

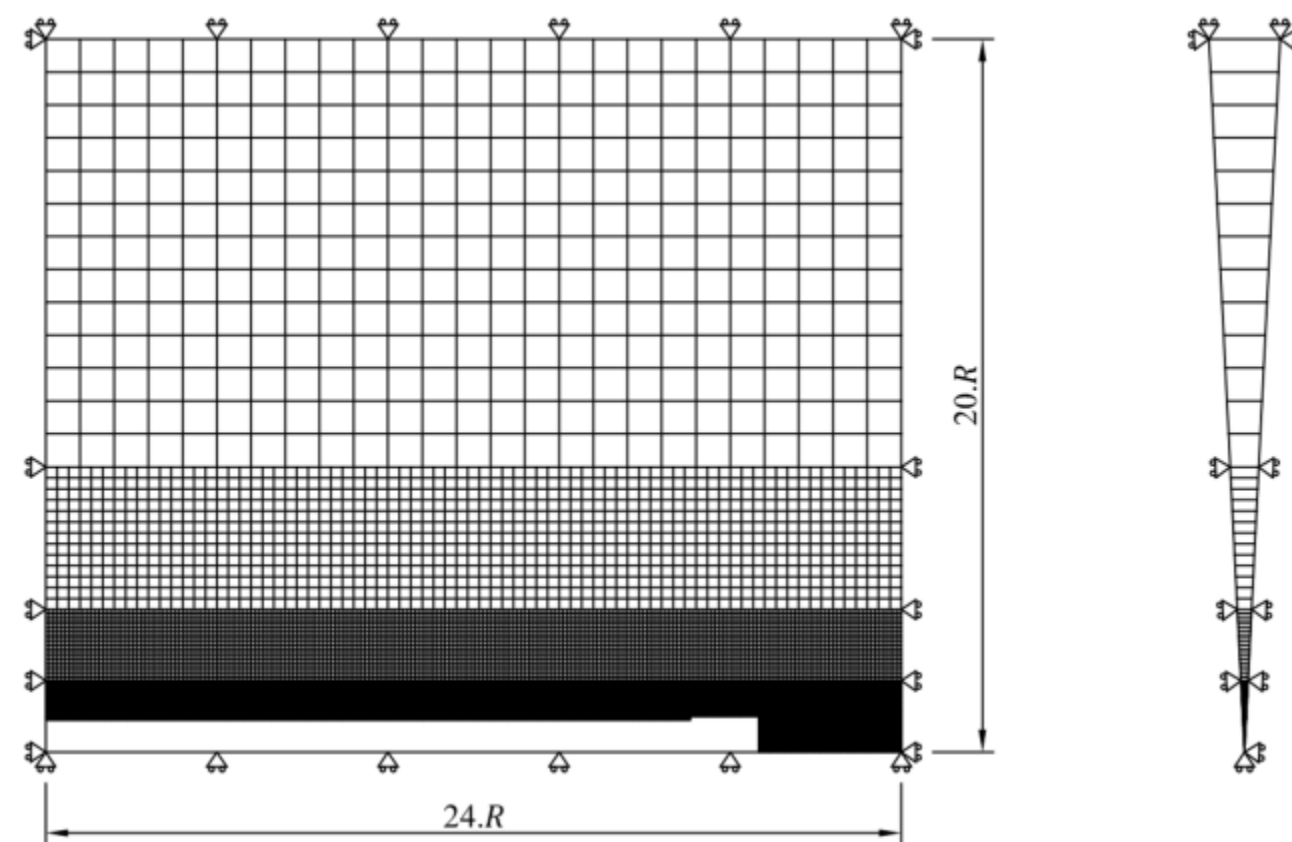
# Surrogate Models

## Complémentarité avec la modélisation numérique

### Thèse A. Tristani (2024)

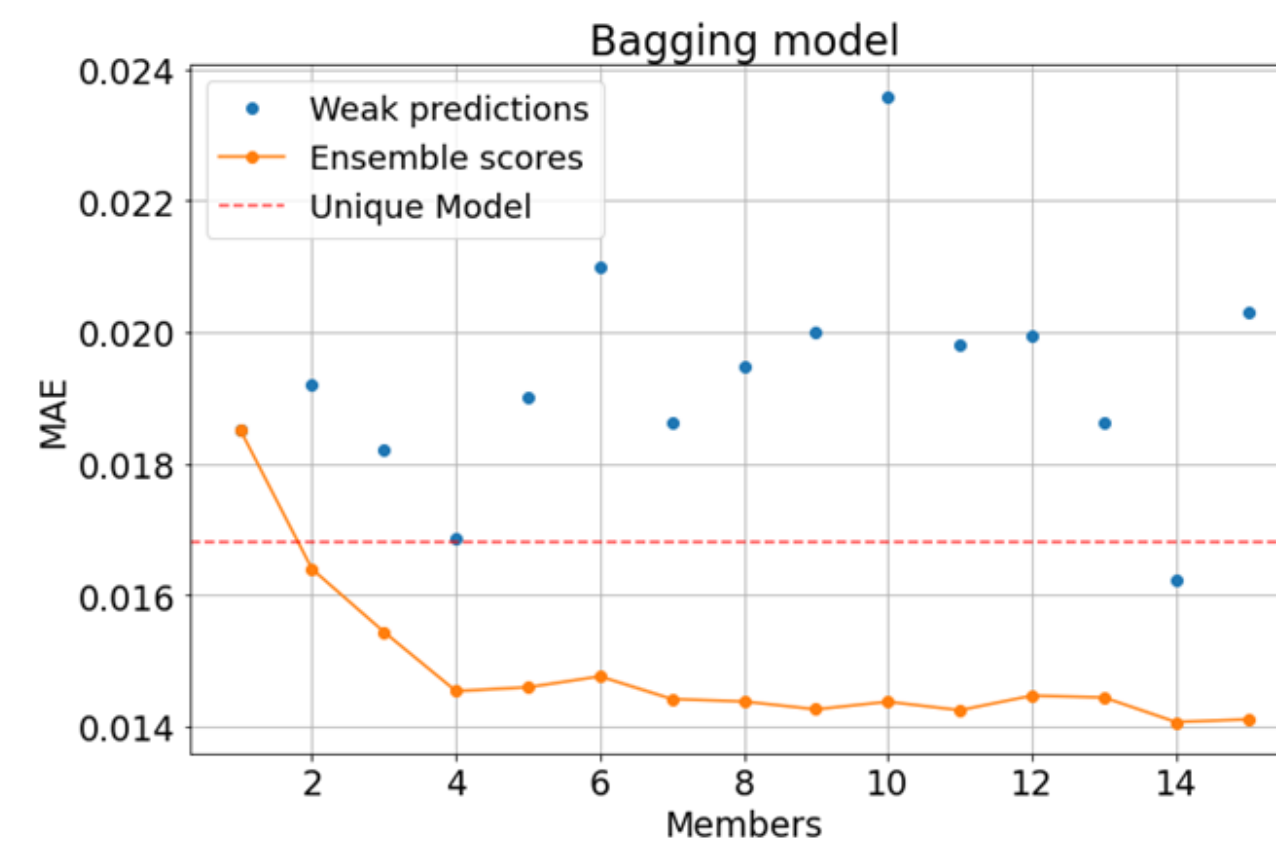
Apprentissage par ANN – Méthode d'ensemble

**5 Entrées :**  $R^* = R/e$ ;  $E^* = E/E_s$ ;  $N$ ;  $\phi$ ;  $\psi$



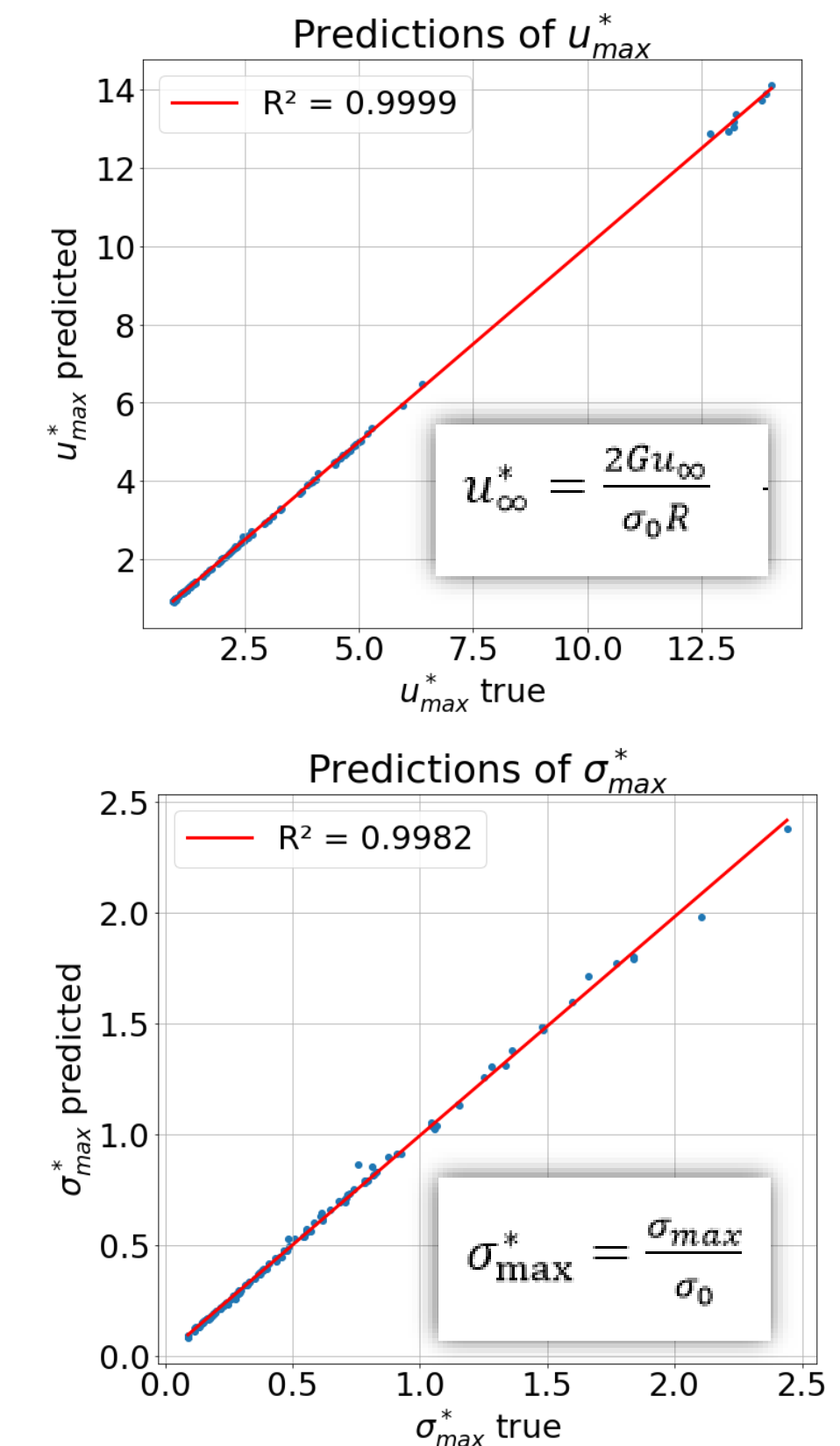
Axisymmetric model (FLAC3D)

De la Fuente et al. (2019). RMRE.



Tristani et al. (2023). ISRM Int. Conf.

### 2 Sorties





*Les modèles numériques ne devraient jamais être considérés comme une « boîte  
noire » qui accepte la saisie de données à une extrémité et produit une prédiction à  
l'autre*

**Prof. E. Eberhardt.**

*Workshop - Rock Mechanics Challenges and Tools for Deep Tunneling*

*ISRM Congress 2023*

*(traduit de l'anglais au français)*

# Est-il possible d'obtenir des modèles/résultats interprétables ?

Received: 17 February 2022 | Revised: 9 February 2023 | Accepted: 10 February 2023

DOI: 10.1002/widm.1493

## OVERVIEW



### **Interpretable and explainable machine learning: A methods-centric overview with concrete examples**

Ričards Marcinkevičs  | Julia E. Vogt

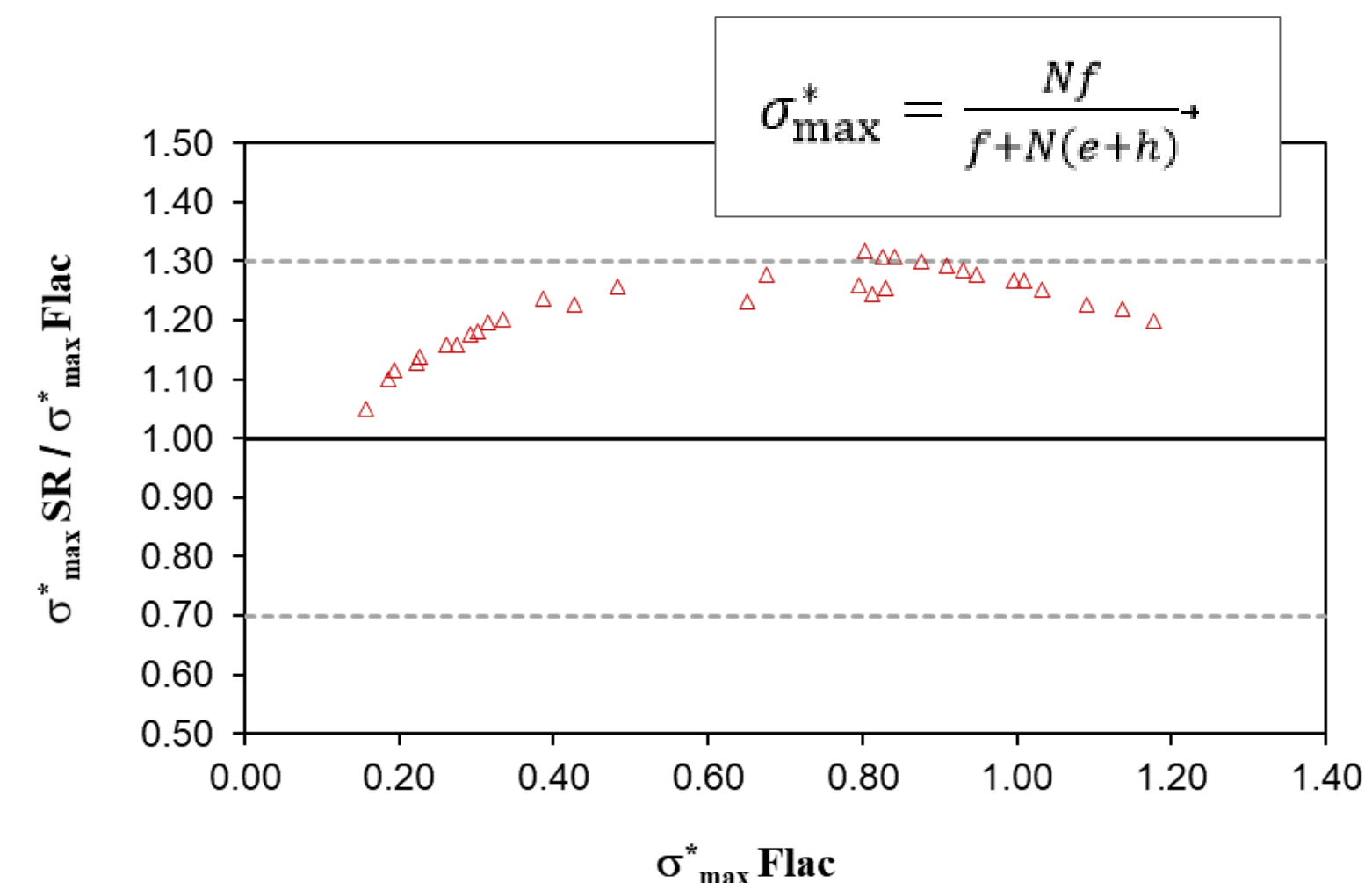
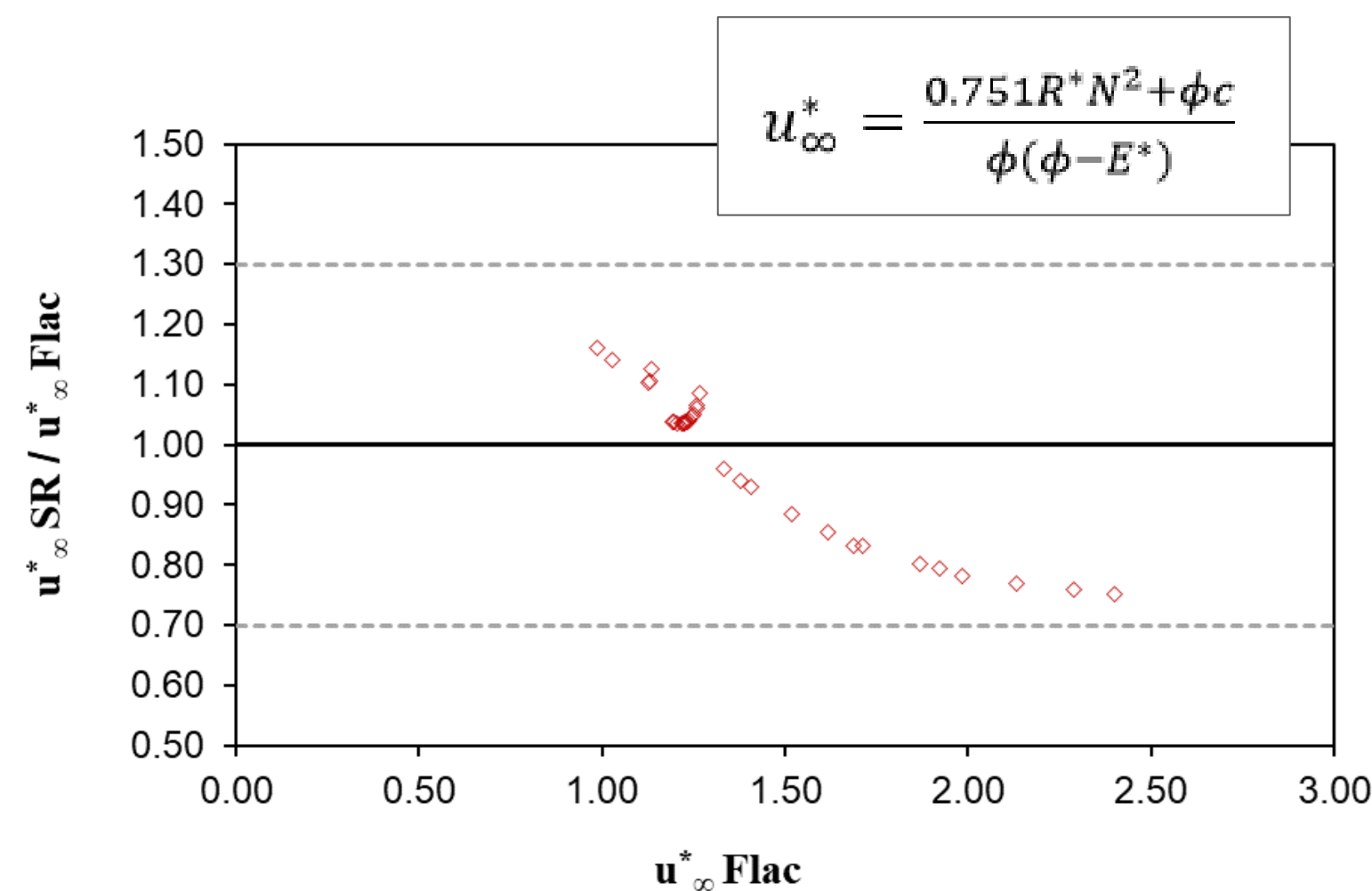
*interpretable ML* focuses on designing models that are *inherently interpretable*, whereas *explainable ML* tries to provide post hoc explanations for existing *black-box* models, that is, models that are incomprehensible to humans or are proprietary (Rudin, 2019). Lipton (2018) stresses the difference in questions the two families of techniques try to address: interpretability raises the question “*How does the model work?*,” whereas explanation methods try to answer “*What else can the model tell me?*”



# Est-il possible d'obtenir des modèles/résultats interprétables ?

## Régression symbolique

- identifier une **expression mathématique** sous-jacente qui **décrit le mieux une relation** (données d'entrée et de sortie) :
  - une fonction **aussi simple que possible**
  - qui décrit bien les données **sans faire d'hypothèses** sur la structure de cette fonction.



# Est-il possible d'obtenir des modèles/résultats interprétables ?

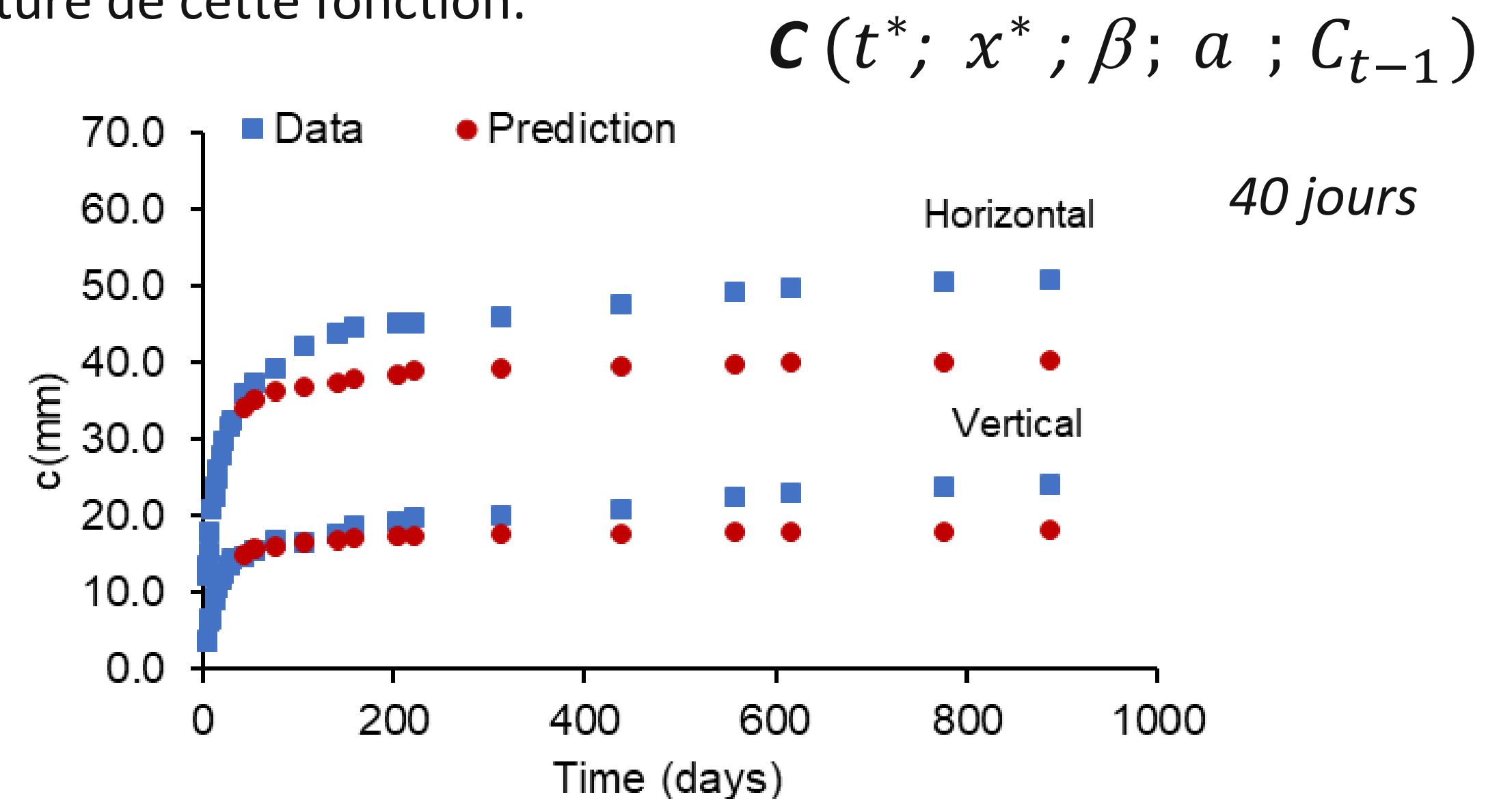
## Régression symbolique

- identifier une **expression mathématique** sous-jacente qui **décrit le mieux une relation** (données d'entrée et de sortie) :
  - une fonction **aussi simple que possible**
  - qui décrit bien les données **sans faire d'hypothèses** sur la structure de cette fonction.

*La surveillance continue de la convergence*



*méthode d'observationnelle*



*Guayacán-Carrillo and Sulem (2024). Eurock 2024 (In progress)*



# Est-il possible d'obtenir des modèles/résultats interprétables ?

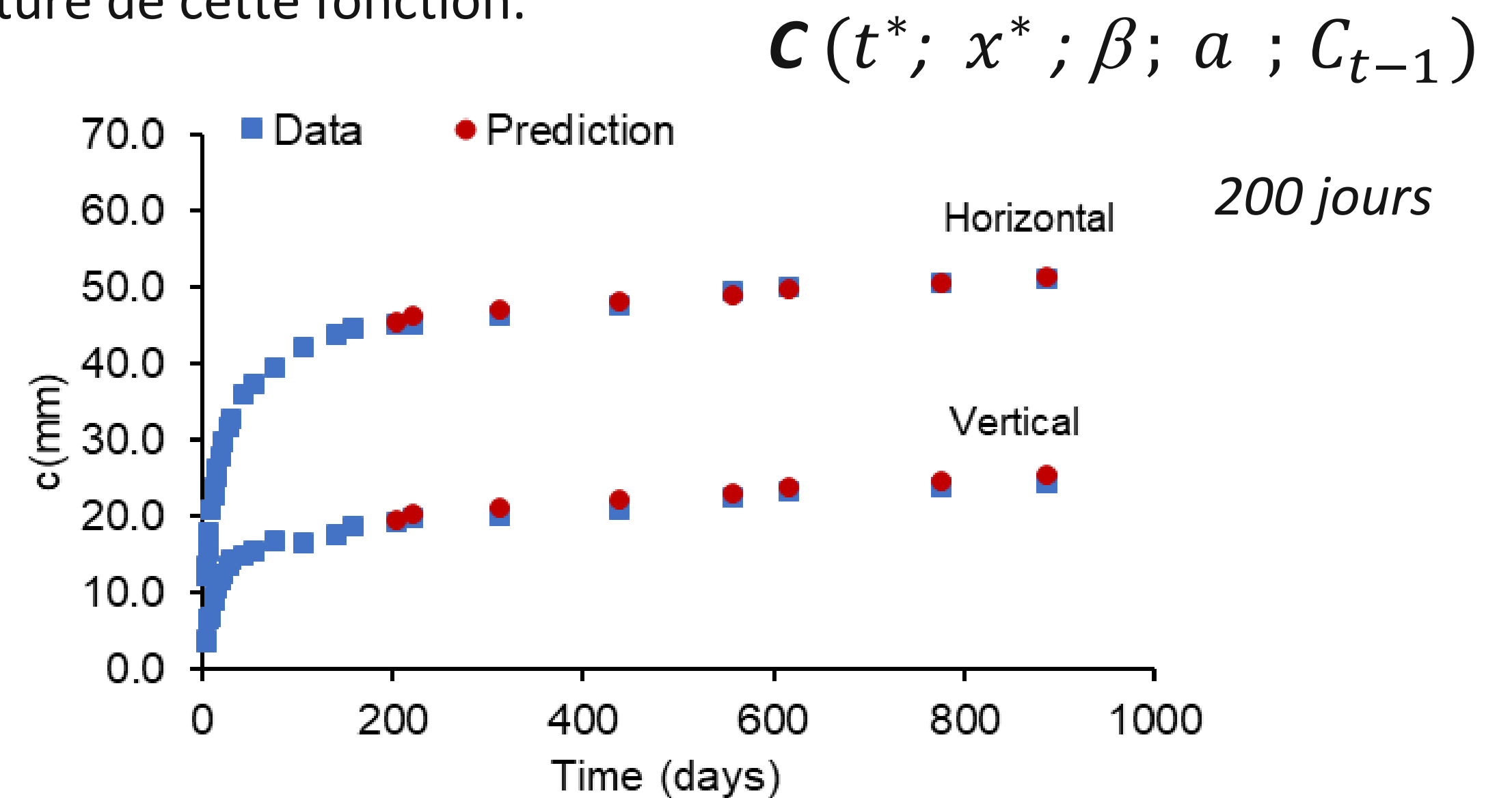
## Régression symbolique

- identifier une **expression mathématique** sous-jacente qui **décrit le mieux une relation** (données d'entrée et de sortie) :
  - une fonction **aussi simple que possible**
  - qui décrit bien les données **sans faire d'hypothèses** sur la structure de cette fonction.

*La surveillance continue de la convergence*



*méthode d'observationnelle*



*Guayacán-Carrillo and Sulem (2024). Eurock 2024 (In progress)*

# Intelligence Artificielle en Géotechnique

## *Points Clés*

- Profiter de la richesse de la donnée

It is **not appropriate** to impose on an engineer the popular “**minimum sample size**” question — how much data is needed for a solution to be useful? The onus is exactly opposite. The burden is on an analysis to inform the engineer **what is the solution precision associated with the data on hand**. The appropriate decision to impose on an engineer is to judge **whether this precision is sufficient** and if not, what **additional measures** should be undertaken to address this issue.

*Phoon and Ching (2021). J. GeoEng., Vol. 16, No. 2, pp. 061-073*



# Intelligence Artificielle en Géotechnique

## *Points Clés*

- Profiter de la richesse de la donnée
- **Les approches d'AI ne doivent pas être utilisées comme un substitut à la pensée, mais comme une aide à la réflexion et à la prise de décision.**

*La conception empirique est basée sur une **collection d'expériences ou d'observations** ... elle s'appuie sur la comparaison des expériences des **pratiques passées** pour prédire le **comportement futur** en fonction des facteurs les plus critiques pour la conception.*

*Il faut se rappeler qu'en s'appuyant sur des expériences antérieures (c.-à-d. des histoires de cas), les outils empiriques sont **donc limités par la gamme de conditions** dans lesquelles ces expériences ont été générées.*

**Prof. E. Eberhardt.**

*Workshop - Rock Mechanics Challenges and Tools for Deep Tunneling*

*ISRM Congress 2023*

*(traduit de l'anglais au français)*

# Intelligence Artificielle en Géotechnique

## *Points Clés*

- Profiter de la richesse de la donnée.
- Les approches d'AI ne doivent pas être utilisées comme un substitut à la pensée, mais comme une aide à la réflexion et à la prise de décision.
- **Quelles attentes - quelle approche ?**
  - \* Recenser
  - \* Analyser
  - \* Explorer

# Intelligence Artificielle en Géotechnique

## *Perspectives*

- \* **Data centric**
  - \* **MUSIC-3X** (Multivariate, Uncertain and Unique, Sparse, Incomplete, and potentially Corrupted with “3X” denoting three dimensional spatial variations). Phoon and Ching (2021). J. GeoEng., Vol. 16, No. 2, pp. 061-073
- \* Il faut dès maintenant commencer la réflexion sur une **IA frugale**
  - \* Comment optimiser les procédures/cycles de notre quotidien ?
- \* Comment **introduire ces nouvelles approches** dans
  - \* la **formation** des futurs ingénieurs,
  - \* la pratique en **industrie**,sans perdre le savoir-faire et l'expertise ?