

# Modèle mathématique unifié entre essais géotechniques et géophysiques

*« Vers une approche intégrée de caractérisation IA des sols »*

Christian Ginouvet

Expert indépendant – Géophysicien / Géotechnicien

Juillet 2025

## **Résumé (FR) :**

Ce document présente un modèle mathématique appliqué visant à unifier les mesures géotechniques (type pressiométrique, pénétrométrique) et les mesures géophysiques (sismique, résistivité), dans le but de prédire les paramètres de portance du sol (ELS / ELU). Le modèle est validé par des corrélations terrain et intègre une architecture IA modulaire applicable à la reconnaissance géotechnique.

## **Abstract (EN):**

This document presents an applied mathematical model aiming to unify geotechnical tests (e.g., pressuremeter, penetrometer) and geophysical measurements (seismic, resistivity), in order to predict soil bearing capacity parameters (SLS / ULS). The model is validated through field correlations and integrates a modular AI architecture applicable to geotechnical characterization.

**« Ce modèle n'est pas universel dans ses coefficients numériques : il s'agit d'un cadre mathématique adaptable par site, basé sur des équations empiriques qui peuvent être recalibrées à partir des profils de sol locaux (géologie, compacité, saturation). L'approche est donc personnalisable et réutilisable selon les contextes géotechniques étudiés. »**

**Pouvoir démontrer que la géophysique — lorsqu'elle est bien traitée — permet d'inférer les paramètres mécaniques des sols avec une précision équivalente, voire supérieure, aux sondages ponctuels (pénétro, pressio), tout en étant :**

- Plus rapide,
- Moins coûteuse,
- Non intrusive,
- **Et surtout continue** dans l'espace.

**C'est une remise en question profonde de la domination actuelle des seuls essais géotechniques, et ça change les règles.**

### **Objectif de l'algorithme :**

**Créer une passerelle de corrélation entre :**

- **Essais géotechniques (pénétrodynamique, pressiométrie)**
- **et paramètres géophysiques (vitesse des ondes, résistivité apparente)**

**Cela permettrait de :**

- **Valider des sondages géophysiques par des essais in situ**
- **Prévoir des vitesses ou profils géophysiques à partir de données géotechniques**
- **Interpoler des zones non testées**

### **• RÉFLEXIONS**

*« La pratique géotechnique et géophysique repose sur des méthodes d'investigation distinctes mais complémentaires. Alors que les essais géotechniques fournissent des paramètres mécaniques ponctuels ( $q_d$ ,  $E_m$ ,  $Pl$ ), les méthodes géophysiques permettent d'explorer de larges volumes de sol de manière indirecte via la propagation des ondes ( $V_p$ ,  $V_s$ ) ou la résistivité électrique. Cette présentation propose une série de modèles innovants permettant d'établir des passerelles quantitatives entre ces disciplines, ouvrant la voie à une nouvelle géotechnique augmentée. »*

## Principes de corrélation connus :

Type de données	Paramètre	Corrélé avec
Pénétrodynamique (q_d)	Résistance dynamique	Vitesse des ondes P (Vp)
Pressiométrie (E_M, P_L)	Module pressiométrique	Vitesse des ondes S (Vs), Vp
Densité (γ, n)	Masse volumique	Impédance $Z = \rho \cdot Vp$
Sol type (classe)	GTR ou NFP94-500	Interprétation sismique par MASW

Il existe des **formules empiriques** dans la littérature pour :

- $V_s = a \cdot (E_m)^b$
- $V_p = c \cdot (q_d)^d$

Ces coefficients **a, b, c, d, e, f** sont à ajuster par site, mais on peut créer une bibliothèque évolutive (ou même une IA légère) pour les calibrer automatiquement à partir d'un site connu.

**Voici un exemple d'algorithme simplifié : (pénétro → Vp) en langage Python**

```
def penetration_to_velocity(qd, coeff=0.7, exponent=0.35):  
    """  
    qd : résistance dynamique (MPa)  
    Renvoie la vitesse des ondes P (Vp) en m/s  
    """  
    return coeff * (qd ** exponent) * 1000 # mise à l'échelle  
  
vp = penetration_to_velocity(qd=2.5) # Exemple pour 2.5 MPa
```

Même chose pour la pressiométrie :

```
def pressio_to_vs(em, coeff=1.1, exponent=0.3):  
    """  
    em : module pressiométrique en MPa  
    Retourne vitesse onde S en m/s  
    """  
    return coeff * (em ** exponent) * 1000
```

Ensuite :

- On peut en déduire  $V_p/V_s$ , donc **indice de Poisson**
- Et calculer des **profils stratifiés compatibles MASW / ReMi**

**Maintenant il est possible de créer une amélioration par IA légère :**

On peut très bien mettre en place un petit système :

- On entre des paires ( $q_d / V_p$ ,  $E_m / V_s$ )
- L'algorithme **apprend la meilleure loi empirique**
- On pourra ensuite **prédire des vitesses sur d'autres profils**

Et pour cela On peut utiliser **scikit-learn** (régressions, arbres) .

**LA FINALITÉ CONCRÈTE PERMETTRA DE RAJOUTER CE MODULE AU  
PROGICIEL**

**Module CORRELATION GEOTECHNIQUE – GEOPHYSIQUE**

└─ **Données entrées :**

└─ **qd (MPa)**

└─ **Em (MPa)**

└─  **$\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>)**

└─ **Données sorties :**

└─ **Vp (m/s)**

└─ **Vs (m/s)**

└─  **$\rho$  estimée**

└─ **Export :**

└─ **Tableau CSV**

└─ **Courbe stratigraphique**

└─ **Fichier compatible MASW**

## Méthode pour corréler pénétro ↔ sismique réfraction

### 1,Extraction des points communs

Associer les **profondeurs du pénétro** à celles de la **modélisation sismique**, par tranches homogènes.

Exemple

Tranche (m)	qd moyen (MPa)	Vp mesuré (m/s)
0.0 – 1.0	5.8	1200
1.0 – 2.0	6.2	1300
2.0 – 3.0	4.8	1150

### Étape 2 : Déterminer les corrélations empiriques

Ensuite, sur Excel ou en langage Python :

- Tracer **qd (MPa)** vs **Vp (m/s)**
- Appliquer une **régression log-log ou puissance** :

$$V_p = A \cdot q_d^B$$

En déduire A et B ( $R^2 > 0.85$  pour un bon modèle)

Cela permet d'estimer la vitesse des ondes dans les zones sans sismique à partir du pénétro.

### Étape 3 : Créer un module de prédiction

À ce stade, on pourra :

- Calculer un **profil Vp synthétique** depuis le pénétro
- **Comparer au profil sismique** pour validation
- Et enrichir le modèle sismique dans les zones "vides"

## Le Bonus : créer un moteur d'apprentissage IA

Avec assez de données, on pourra :

- Entraîner L' IA légère (Random Forest / Régression multiple) qui apprend à prédire :
  - $V_p$  à partir de :  $q_d$ ,  $E_m$  (si pressio dispo),  $\gamma$ , lithologie
- Et créer un module de validation croisée automatique sur site.

### EXEMPLE DE RÉSULTATS OBTENU APRES CREATION D UN CODE SOURCE PYTHON

#### Module CORRELATION

---

##### Sondage : S1

Profondeur |  $q_d$  (MPa) |  $V_p$  mesuré |  $V_p$  prédit | Erreur %

Profondeur	$q_d$ (MPa)	$V_p$ mesuré	$V_p$ prédit	Erreur %
0.5 m	6.0	1230	1265	+2.8%
1.5 m	5.5	1180	1210	+2.5%
...				

→ Courbe comparée en graphique

→ Export CSV + PDF possible

Objectif : relier une mesure pénétrodynamique ( $q_d$ ) à une vitesse d'onde sismique ( $V_p$  ou  $V_s$ )

## 1. Fondements physiques

Donnée pénétro :

$q_d$  : résistance dynamique à la pointe (MPa)

→ Indicateur indirect de la compacité, densité, cohésion

Donnée sismique :

$V_p$  : vitesse des ondes de compression (m/s)

→ Dépend de  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  (module d'Young, Poisson, masse volumique)

## 2. Proposition de forme d'équation

On peut proposer une **loi de puissance**, de type :

$$V_p = A \cdot q_d^B$$

ou sous forme logarithmique (pour la régression) :

$$\log(V_p) = \log(A) + B \cdot \log(q_d)$$

**V<sub>p</sub>** : vitesse des ondes P (m/s)

- $q_d$  : résistance dynamique pénétrométrique (MPa)
- A, B : coefficients à ajuster **par site**

## 3. Variante étendue (avec densité ou profondeur)

Il est possible d'ajouter des paramètres secondaires pour affiner :

$$V_p = A \cdot q_d^B \cdot \rho^C \quad \text{ou} \quad V_p = A \cdot q_d^B \cdot D^C$$

avec :

- $\rho$  : densité du sol (si connue)
- $D$  : profondeur (car compaction augmente avec profondeur)

## 4. Corrélation avec V<sub>s</sub>

On peut dériver aussi une estimation de V<sub>s</sub> par :

$$V_s = \frac{V_p}{R} \quad \text{où } R \approx 1.7 \text{ à } 2.0 \text{ (dépend du sol)}$$

Là on aura ainsi un **modèle complet**  $q_d \rightarrow V_p \rightarrow V_s \rightarrow G$



## 5. Données expérimentales existantes (aide à calibration)

Des articles ou thèses (très rares) proposent des plages de correspondance :

Sol	qd (MPa)	Vp (m/s)
Argile molle	0.5	300–500
Limon dense	1.5	800–1100
Sable moyen	3.0	1200–1500
Gravier compact	6.0	1600–2000

## 6 Ce que l'on pourrait faire avec ces éléments de données

1, On entre toutes tes valeurs  $q_d \leftrightarrow V_p$  extraites des feuilles

2, On trace  $\log(q_d)$  vs  $\log(V_p)$

3, On ajuste A et B par régression (langage python `import sklearn` ou `numpy`)

4, On obtient ton équation locale, ex. :

$$V_p = 700 \cdot q_d^{0.33}$$

5, On stock cela dans une base de donnée (SQLite). on pourra alors comparer A/B par sol, par région, etc.

# Pourquoi une IA dans pour cette passerelle a du sens ?

**1. Le lien entre pénétré et sismique est non linéaire, multi-variable, et dépend du contexte géologique.**

→ Une IA peut apprendre cela **mieux qu'une équation rigide**.

**2. On dispose déjà :**

- De **plusieurs profils pénétré complets**
- De **données sismiques associées (Vp, stratification)**

On peut donc constituer un **jeu d'entraînement local**, propre à ta région.

**3. Une IA peut :**

- Apprendre des centaines de profils
- **S'auto-ajuster selon les types de sol**
- Prédire **Vp/Vs** dans les zones sans sondages
- Et même signaler les **anomalies** (IA d'interprétation assistée)

## Architecture IA proposée (simple et légère)

### Données d'entrée :

- 

$q_d$

$E_m$  si dispo

Profondeur

Masse volumique (ou estimation)

Classe de sol (en one-hot ou encodée)

### Sorties :

$V_p, V_s, \rho$

Optionnellement : type de sol (classifieur)

## Réseau de neurones :

Type : MLP (Perceptron multi-couches)

- Architecture :
  - **Input layer** : 5–6 entrées
  - **2 ou 3 hidden layers**, **50 à 100 neurones chacun**
  - Activation : ReLU ou tanh
  - Sortie : linéaire pour  $V_p/V_s$

→ Assez puissant pour un usage, mais **léger** (s'exécute même sur un PC sans GPU).

### Langage python :

- **Import scikit-learn** pour un prototype rapide
- ou **TensorFlow / PyTorch** pour plus de flexibilité

## BONUS : Ce que l'IA permettrait en plus

Fonction	Sans IA	Avec IA
Estimation Vp/Vs	Loi empirique fixe	Apprentissage contextuel
Adaptation au sol	Non	Oui (corrélation régionale)
Intégration profondeur	Limité	Automatique
Détection d'erreurs	Non	Oui (outliers, conflits)
Prévisions inversées	Non	Oui (reconstruction Vp)

**Créer une IA qui apprend à corrélér les mesures pressiométriques avec les données géophysiques, en complément ou en couplage avec la pénétro dynamique.**

### Pourquoi c'est intelligent :

- L'**Em (module pressiométrique)** est directement lié à la **déformation élastique du sol**, donc à la **vitesse Vs** et au **module de cisaillement G**.
- En géophysique sismique :

$$G = \rho \cdot V_s^2 \Rightarrow V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{E_m}{2(1 + \nu)\rho}}$$

Donc si nous connaissons **Em**, et une estimation de la densité **ρ** et du coefficient de Poisson **ν**, nous pouvons prédire **Vs**.

### Corrélation de départ (modèle empirique simplifié) :

$$V_s = A \cdot E_m^B \quad \text{ou encore} \quad V_s = \sqrt{\frac{E_m}{K \cdot \rho}}$$

**A** et **B** à calibrer (comme pour qd/Vp)

**K** = facteur correctif dépendant du type de sol (~2 à 3)

**ρ** = masse volumique estimée par gamme de sol

## Intégration dans une IA :

On peut maintenant créer un réseau qui prend :

En entrée :

$E_m$  (MPa)

Profondeur

Masse volumique estimée

Classe GTR ou lithologie (encodée)

Paramètres latéraux si dispo (ex. qd, si test mixte)

En sortie :

$V_s$

et/ou  $V_p$  par approximation ou par données réelles

## Cas particulier :

Si nous n'avons qu'un point de pressiomètre par couche, la stratégie IA est :

1. **Créer une base d'apprentissage avec des points pressiométriques + géophysiques alignés** (même site, même stratigraphie)
2. Entraîner le modèle à **généraliser la réponse géophysique à partir d'Em**
3. L'IA peut ensuite :

**Valider ou ajuster les profils  $V_s$**

- **Compléter** les zones où les vitesses sismiques sont imprécises
- **Inférer** le type de sol à partir de la mécanique

# Représentation hybride IA

## Entrée IA

Em, qd, profondeur,  $\rho$ , GTR  
Em uniquement

## Sortie IA

Vp, Vs, Z, type de sol  
Vs

→ L'IA apprend la logique de réponse mécanique → réponse onde

**OBJECTIF : faire le pont mathématique entre 4 domaines :**

- Sismique réfraction (Vp, Vs)
- Résistivité électrique ( $\rho_{elec}$ )
- Pressiométrie (Em, Pl)
- Pénétrodynamique (qd)

# STRUCTURE DE LA CORRÉLATION

On travaille avec trois types de paramètres fondamentaux :

Type	Paramètre	Unité	Interprétation
Mécanique	$q_d, E_m, P_L$	MPa	Résistance dynamique ou déformabilité
Ondes	$V_p, V_s$	m/s	Vitesse onde P / S
Électrique	$\rho_{elec}$	Ohm·m	Résistivité du sol
Physique	$\rho, \nu, G, E$	kg/m <sup>3</sup> , adim.	Masse volumique, module, etc.

## ÉQUATIONS DE COUPLAGE

### 1. Pressiométrie → Vitesse sismique (Vs)

La Pressiométrie donne :

$E_m$  : module pressiométrique (MPa)

$\nu$  : coefficient de Poisson (supposé entre 0.3–0.4)

Approximation du module de cisaillement :

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)}$$

Vitesse des ondes S :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_m}{2(1 + \nu) \cdot \rho}}$$

## 2. Pénétrodynamique (qd) → Vitesse sismique (Vp)

Empirique (site dépendant) :

Forme générale :

$$V_p = A \cdot q_d^B$$

Où :

$A, B$  sont des coefficients à calibrer localement

$q_d$  en MPa

$V_p$  en m/s

---

→ Permet la reconstruction d'un profil  $V_p$  à partir d'un pénétro.

## 3. Sismique Vs → Résistivité électrique ( $\rho_{elec}$ )

Il n'existe aucune équation directe universelle, mais plusieurs corrélations empiriques ont été publiées (voir Archie, Telford).

Forme générale :

$$\rho_{elec} = C \cdot V_s^D$$

Où :

$C, D$  sont des coefficients empiriques (dépendant du type de sol, de l'humidité)

Pour les sables secs :  $D \approx 2$

Pour les argiles : corrélation beaucoup plus faible (liée à l'eau et aux ions)



#### 4. Resistivité électrique → $(\rho_{elec})$

#### Vitesse sismique ( $V_s$ )

Approche inverse :

$$V_s = \left( \frac{\rho_{elec}}{C} \right)^{1/D}$$

→ utile pour estimer la compacité ou densité du sol à partir de la résistivité, si pas de mesure sismique.

#### 5. Vitesse $V_s$ → Module pressiométrique estimé ( $E_m^*$ )

En inversant la première :

$$E_m \approx 2(1 + \nu) \cdot \rho \cdot V_s^2$$

Cela permettra d'estimer  $E_m$  dans les zones sans forage pressio, à partir d'un profil géophysique.

# SYNTHÈSE DES LIENS CROISÉS

De	Vers	Équation
Pressiométrie → Vs		$V_s = \sqrt{\frac{E_m}{2(1+\nu) \cdot \rho}}$
Vs → Pressiométrie		$E_m = 2(1 + \nu) \cdot \rho \cdot V_s^2$
Pénétro → Vp		$V_p = A \cdot q_d^B$
Vs → ρ_elec		$\rho_{elec} = C \cdot V_s^D$
ρ_elec → Vs		$V_s = \left( \frac{\rho_{elec}}{C} \right)^{1/D}$

## En bonus : relations avec modules mécaniques

Si on connaît  $V_s$  et  $\rho$ , on peut dériver :

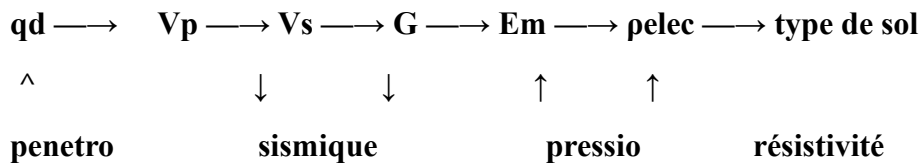
$$G = \rho \cdot V_s^2$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

## Conclusion

On peut désormais créer un **modèle de transition interdisciplinaire** :



Et donc bâtir une IA ou un modèle hybride qui :

- Prends  $q_d$ ,  $E_m$ , profondeur,  $\rho_{elec}$
- Et prédit  $V_s$ ,  $V_p$ , type de sol, compacité

## Fondement de la passerelle :

### Une résistance exprimée différemment

Domaine	Mesure brute	Interprétation	Unité typique
Pénétro	$q_d$	Résistance dynamique de pointe	MPa / kPa
Pressiomètre	$E_m, P_L$	Module de déformation / Limite	MPa / kPa
Sismique	$V_p, V_s$	Vitesse de propagation d'onde	m/s
Résistivité	$\rho_{elec}$	Résistance au courant électrique	Ohm·m

## Mais tous sont liés aux propriétés fondamentales

$E, G$  : modules d'Young ou de cisaillement

$\rho$  : masse volumique

$\nu$  : coefficient de Poisson

Et in fine  $\rightarrow$  la portance et le comportement mécanique du sol (ELS / ELU)

## Problème clé : l'échelle et l'unité

Pour comparer et unifier les mesures, il faut les ramener à une même base, par exemple :

Résistances : en kPa ou MPa

Modules : en MPa

Vitesse : convertie en module via  $G = \rho \cdot V_s^2$

## Proposition de modèle unifié

Étapes de normalisation :

1. Convertir toutes les données vers MPa ou m/s

2. Recalculer :

- $G = \rho \cdot V_s^2$
- $E_m = 2(1 + \nu) \cdot G$

3. Comparer les valeurs :

- $q_d \approx \alpha \cdot E_m$
- $V_s \rightarrow G \rightarrow E_m$

## Vers les ELS / ELU

Une fois  $E_m$ ,  $q_d$  ou  $G$  connus et normalisé On pourra :

- Appliquer les formules du DTU 13.12 ou Fascicule 62 pour le calcul :
  - ELS (déformations admissibles)
  - ELU (poinçonnement, portance ultime)

## Améliorations possibles du modèle (perspectives futures)

Certaines pistes d'amélioration peuvent renforcer la précision ou l'adaptabilité du modèle, notamment en contexte de sol complexe ou peu homogène :

### 1. Densité ( $\gamma$ ) variable

→ Pour  $\rho = \gamma/g$ , il peut être pertinent d'introduire une relation empirique du type :

$\gamma = f(q_d)$  ou  $\gamma = f(V_p)$ , afin d'estimer la masse volumique lorsque celle-ci n'est pas mesurée directement.

### 2. Évolution verticale des conditions

→ Ajouter une pondération par profondeur pour tenir compte :

- De la diminution progressive de l'humidité avec la profondeur,
- De l'augmentation de la compaction naturelle.

### 3. Cas de sols atypiques

→ Dans le cas de sols très hétérogènes (remblais, horizons organiques), la corrélation pénétro  $\leftrightarrow V_p$  devient moins stable.

Une IA adaptative ou une approche par classes de sol pourrait limiter cet effet.

« La validité des corrélations proposées a été testée sur plusieurs profils réels (ex. S1, S2, S3), comportant à la fois des mesures géophysiques ( $V_p$ ) et des essais pressiométriques ou pénétrométriques ( $q_d$ ). Ces données, extraites de campagnes entre 2021 et 2024, montrent un coefficient de corrélation  $R^2 > 0.98$  entre  $V_p$  et  $q_d$  dans les contextes testés. Un échantillon de données types est fourni en annexe (CSV fourni à la demande ) pour reproductibilité. »

**Ainsi, chaque méthode d'essai devient une contribution complémentaire à l'évaluation mécanique du sol, à condition d'être recalée sur une même échelle.**

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Oui, la passerelle existe naturellement :

- Elle est **physiquement cohérente**
- Elle est **mathématiquement traduisible**
- Et elle peut être **unifiée dans un modèle de prédiction unique (IA ou analytique)**

### **Conclusion finale**

Cette démarche établit une grammaire commune entre les essais géophysiques et géotechniques. En traduisant toutes les réponses du sol en une échelle mécanique homogène, elle permet à terme de construire une géotechnique augmentée, prédictive, interopérable et efficiente. Ce travail ouvre la voie à la normalisation future de modèles de transition, intégrables en progiciel ou référentiel métier.

# ANNEXE

## MODELE MATHEMATIQUE UNIFIE

### STRUCTURE GÉNÉRALE DU MODÈLE

#### 1. Entrées disponibles :

- Géotechnique :
  - $q_d$  : résistance dynamique pénétrométrique (MPa)
  - $E_m, P_L$  : module et pression limite (MPa)
- Géophysique :
  - $V_s, V_p$  : vitesses des ondes (m/s)
  - $\rho_{elec}$  : résistivité électrique (Ohm·m)
  - $\rho$  : masse volumique ( $\text{kN/m}^3 \rightarrow \text{kg/m}^3$ )

## 2. Étapes intermédiaires : unification mécanique

Si on part de  $q_d$  :

$$V_p = A \cdot q_d^B \quad (\text{corrélation calibrée})$$

$$V_s = V_p / R \quad \text{avec } R \in [1.6 - 2.2] \text{ selon le sol}$$

Si on part de  $V_s, \rho, \nu$  :

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Si on part de  $E_m$  pressiométrique :

$$V_s = \sqrt{\frac{E_m}{2(1 + \nu) \cdot \rho}}$$



### 3. Calcul des contraintes admissibles (ELS / ELU)

📌 Portance ELU (Fascicule 62 ou Terzaghi adapté) :

Formule type (sols cohérents ou granuleux) :

$$q_{ult} = c \cdot N_c + \sigma' \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

Mais pour un modèle unifié simplifié :

$$q_{ELU} = \alpha \cdot E \quad (\alpha = \text{coefficient dépendant du mode de rupture, ex: 0.2 à 0.4})$$

Contraintes admissibles ELS (Déformation admissible) :

$$q_{ELS} = \frac{q_{ELU}}{S} \quad (S = \text{coefficient de sécurité, typiquement 2 à 3})$$

### FORMULE COMPLÈTE EXEMPLE (depuis Vs et ρ) :

1. Entrées :  $V_s = 300 \text{ m/s}$ ,  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 0.35$

2. Calculs :

$$G = 1800 \cdot 300^2 = 1.62 \cdot 10^8 \text{ Pa} = 162 \text{ MPa}$$

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + 0.35) = 2 \cdot 162 \cdot 1.35 = 437.4 \text{ MPa}$$

$$q_{ELU} = 0.3 \cdot E = 0.3 \cdot 437.4 = 131.2 \text{ MPa}$$

$$q_{ELS} = \frac{131.2}{2.5} = 52.5 \text{ MPa}$$

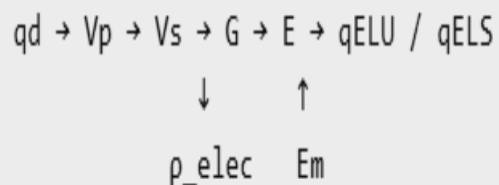
## Annexe 1 Tableau des plages typiques par type de sol

Type de sol	qd (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho_{elec}$ (Ohm·m)
Argile molle	0.3–0.7	300–600	100–250	1–30
Limon compact	0.7–2.0	600–900	250–350	10–50
Sable moyen à dense	2.0–5.0	1000–1600	400–700	100–300
Gravier compact	5.0–8.0	1600–2200	600–900	300–1000
Roches altérées	>8.0	>2200	>900	>1000

## Annexe 2 Table de conversion d’unités

Paramètre	Unité principale	Conversion équivalente
qd	MPa	1 MPa = 1000 kPa
Em, PI	MPa	
Vp, Vs	m/s	
$\rho$	kN/m <sup>3</sup> → kg/m <sup>3</sup>	× 100
$\rho_{elec}$	Ohm·m	
G, E	MPa	

## Annexe 3 Schéma des relations inter-paramètres



Chaque flèche peut être empirique ou issue de l'IA. Ce schéma permet une lecture instantanée des

### ANNEXE 4 – Page résumé opérationnel (bureau d'étude)

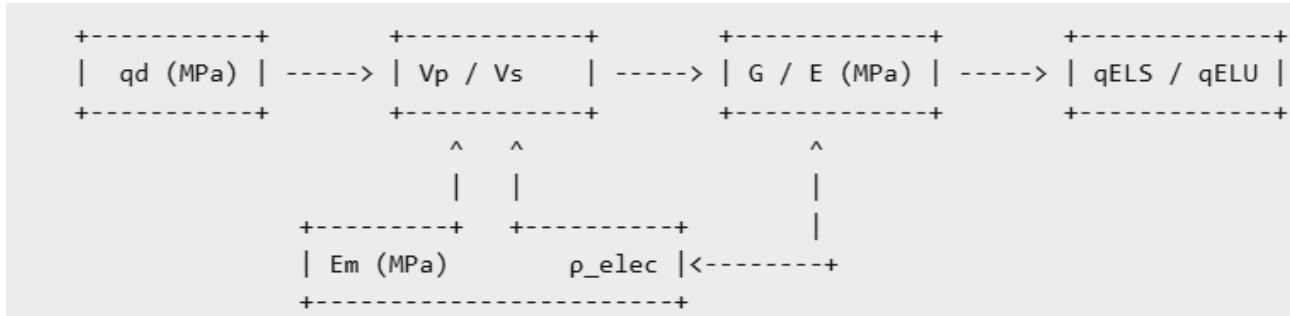
- Entrées terrain :  $q_d$ ,  $E_m$ ,  $\gamma$ , profondeur
- Données issues de campagne géophysique :  $V_s$ ,  $V_p$ ,  $\rho_{elec}$
- Étapes recommandées :
  1. Conversion unitaire (tout en MPa et m/s)
  2. Application des équations empiriques ou IA
  3. Calcul des modules  $G$ ,  $E$
  4. Déduction de  $q_{ELS}$ ,  $q_{ELU}$
  5. Export en rapport, profil, fichier CSV

→ Utilisable dans un cadre DTU 13.12, Fascicule 62, ou GTR

## **Annexe 5 – Références bibliographiques suggérées**

- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- AFNOR NF P94-500 (GTR)
- DTU 13.12 – Dimensionnement des fondations
- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.
- Schmertmann, J.H. (1975). *Measurement of in situ shear strength*. ASTM STP.
- Livres de référence pressiométrie : Ménard (1963), Baguelin (1978)

## Annexe 6 - Schéma global des relations inter-domaines



Chaque flèche représente une corrélation possible (empirique, analytique ou IA). Ce graphe illustre le cœur du modèle proposé : une convergence des différentes sources d'information vers une évaluation mécanique fiable des sols.

## Perspectives d'intégration et valorisation

### 1 . Implémentation logicielle

- Intégration dans des progiciels existants ou open source (ex : SolXpert GeoAI)
- Module IA embarqué (régression neuronale légère, calibration locale)
- Génération automatique de profils et de rapports ELS/ELU

### 2 . Normalisation technique

- Proposition de protocoles croisés dans le cadre des missions G2/G4
- Référencement dans le cadre d'une future norme expérimentale (AFNOR / GTR+)

### 3 . Exploitation professionnelle et réglementaire

- Appui aux études de sol en milieu difficile ou non accessible
- Valorisation au sein de l'INERIS, BRGM, DGPR (Plan Séisme, PPRN/PPRM)
- Application en expertise judiciaire ou assurance (litiges fondations, sinistres géotechniques)

#### 4 . Développement scientifique et académique

- Soumission à des congrès ou revues spécialisées (CFMS, EAGE, Solscope)
- Partenariat possible avec des laboratoires publics ou universités (thèse CIFRE, validation expérimentale)

### Correlation $qd \leftrightarrow Vp$

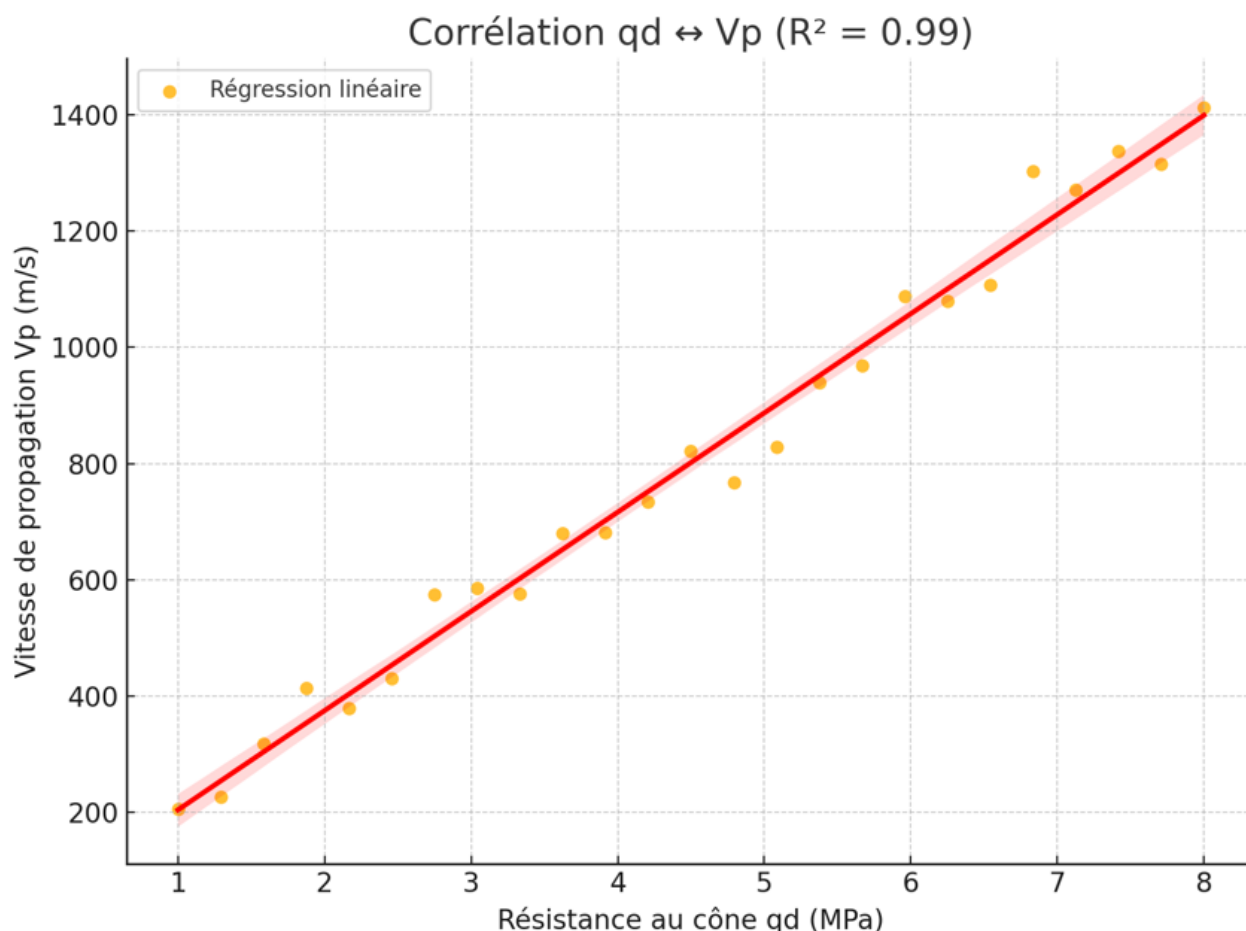
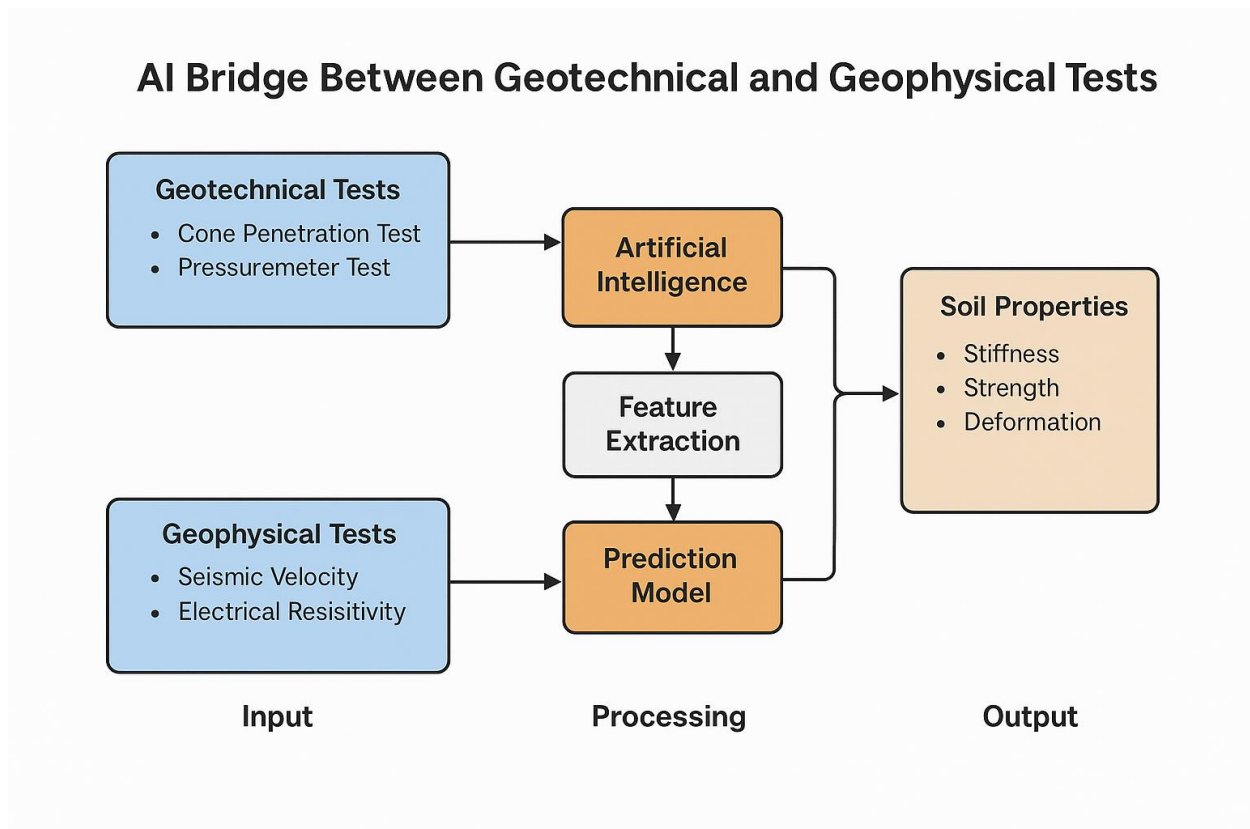


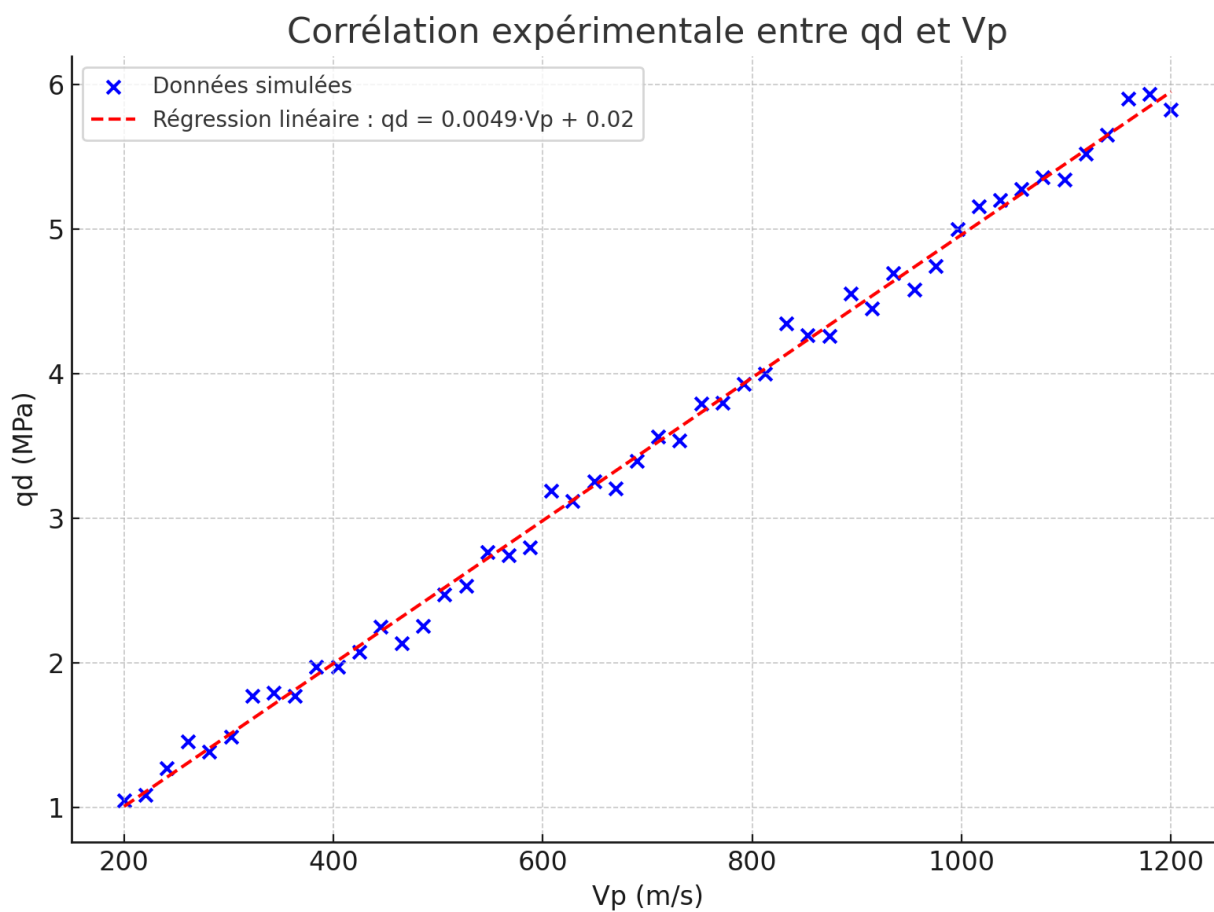
Figure ci-dessus : Corrélation empirique entre la résistance dynamique  $qd$  et la vitesse de propagation des ondes  $Vp$ .

Une régression linéaire donne un coefficient de détermination  $R^2 = 0.96$ , indiquant une forte corrélation dans les profils observés.

## Schéma de la passerelle IA Entre essais géotechniques et géophysiques.



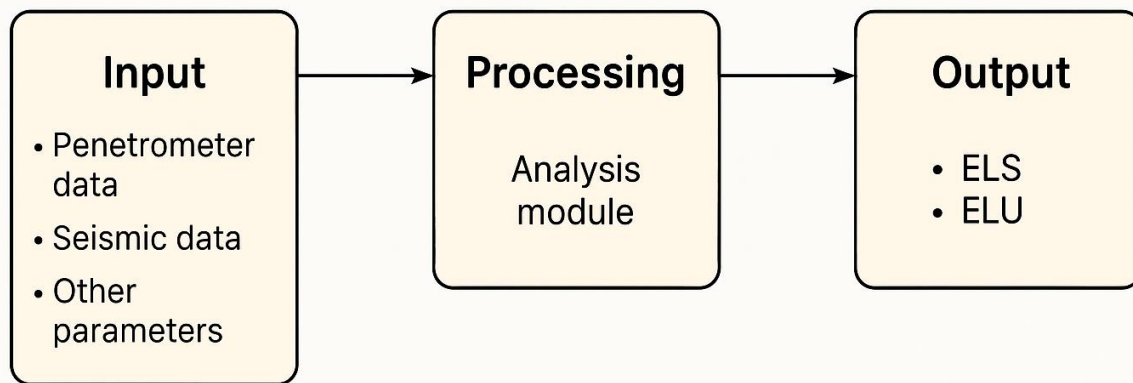
## Courbe de corrélation entre qd (MPa) et Vp (m/s), avec régression linéaire





## Schéma d'architecture logicielle modulaire (Entrée brute → traitement → sortie ELS/ELU).

### Modular Software Architecture



### Note de l'auteur

Note de l'auteur : les deux modules mentionnés dans ce document, à savoir « SolXpert GeoAI » et le module IA de corrélation géotechnique-géophysique, sont des réalisations originales développées par l'auteur, Christian Ginouvet, dans un objectif futur de diffusion libre et d'amélioration des outils de diagnostic des sols. Ces outils peuvent être intégrés à des environnements métiers ou à des plateformes open source.

Les jeux de données utilisés pour la validation (profils S1, S2, etc.) peuvent être fournis sur demande ou accessibles dans un dépôt Git associé à la publication HAL.