

Modèle mathématique unifié reliant les mesures  
électromagnétiques, sismiques, électriques et  
géotechniques :  
la passerelle physique entre géoradar, sismique  
de réfraction, résistivité, pressiométrie et  
pénétrométrie.

Unified Mathematical Model Linking Seismic,  
Electromagnetic, Electrical and Geotechnical  
Measurements:  
The Physical Bridge Between GPR, Seismic  
Refraction, Resistivity, Pressuremeter and  
Penetrometer Tests.

*Christian Ginouvet -GEMSOL France & UK  
Research Engineer in Geophysics, Geotechnics & AI Systems*

« Vers une inversion conjointe multiphysique des propriétés mécaniques et biologiques des milieux poreux »

« Ce travail établit pour la première fois une passerelle mathématique complète entre les domaines électromagnétique, sismique, électrique et mécanique des sols, unifiant les équations de CRIM, Gassmann, Archie, Bishop et Ménard pour déduire directement les paramètres géotechniques (portance, compressibilité, module E, tassement) à partir des mesures géophysiques et pressiométriques ».

“Conventional geotechnical and geophysical methods are usually analyzed independently. This work demonstrates that a unified mathematical bridge can overcome this separation, leading to a common multiphysical interpretation of subsurface behavior.

Keywords: Geophysics, Geotechnics, GPR, Seismic Refraction, Resistivity, Pressuremeter, AI, Quantum Model, Tumor Detection.

## Table des matières

Abstract: .....	4
Résumé : .....	5
Formulation mathématique du modèle unifié .....	6
1) Notations & variables communes .....	6
2) Physique électromagnétique (GPR) .....	6
(2.1) Vitesse EM et permittivité effective .....	6
3) Physique élastique (réfraction sismique) .....	7
(3.1) Vitesse de compression.....	7
(3.2) Gassmann (milieux poreux, BF) .....	7
4) Physique électrique (résistivité) .....	7
(4.1) Loi d'Archie généralisée.....	7
5) Mécanique des sols non saturés (pont vers géotechnique) .....	8
(5.1) Contraintes effectives (Bishop / “suction stress”) .....	8
6) Essais pressiométriques et pénétrométriques.....	8
(6.1) Pressiomètre (Ménard) .....	8
6.2) Pénétromètre (SPT/CPT) .....	8
<b>Passerelles Vs–SPT/CPT (pour dialoguer BE)</b> .....	8
7) Fonctions de projection “géotechnique” .....	9
8) Système direct (forward) par physique .....	9
9) Inversion conjointe multiphysique .....	10
(9.1) Fonction coût multi-objectif avec couplage pétrophysique + structurel .....	10
(9.2) Bornes & convexification partielle.....	10
(9.3) Stratégie numérique .....	10
10) Schéma conceptuel du modèle unifié.....	11
11) Tableau de bornes et paramètres typiques (Annexe A).....	12
(11.1) Tableau A1 — Bornes et valeurs typiques utilisées pour l’inversion multiphysique. ....	12
12) Conclusion .....	13
(12.1) Conclusion (English version).....	14
13) Conclusion générale et perspectives .....	15
(13.1) Synthèse du travail .....	15
(13.2) Apports majeurs et retombées pratiques .....	15
14). Perspectives de recherche .....	16
a) Vers une inversion 3D multiphysique .....	16
b) Intégration de l’intelligence artificielle .....	16
c) Extension au domaine biomédical .....	16

d) Applications environnementales et énergétiques .....	16
15). Conclusion finale .....	17
English version .....	18
Déclaration de l’auteur et propriété intellectuelle .....	18
Author Declaration and Intellectual Property Statement.....	19
16) ANNEXE .....	20
Références bibliographiques .....	20
1. Lois fondamentales de la passerelle multiphysique .....	20
2. Relations hydriques et non saturées .....	20
3. Relations élastiques et poroélastiques .....	21
4. Relations électromagnétiques et diélectriques (GPR).....	21
5. Inversion conjointe et couplage multiphysique .....	22
6. Corrélations géotechniques et modules .....	22
7. Extensions biomédicales et applications analogiques.....	23
8. Outils numériques et implémentation IA.....	23

## Abstract:

This study introduces, for the first time, a unified mathematical framework linking electromagnetic, elastic, electrical, and mechanical measurements of soils. The objective is to establish a physical and quantitative bridge between *Ground Penetrating Radar (GPR)*, *Seismic Refraction*, *Electrical Resistivity Tomography (ERT)*, and *in-situ geotechnical tests* (Pressuremeter and Penetrometer).

The model is based on the coupling of five fundamental equations describing soil behavior across different domains:

- **CRIM/Looyenga** for the dielectric mixing law of the GPR velocity,
- **Gassmann** for the elastic bulk modulus in seismic refraction,
- **Archie's Law** for the electrical resistivity of saturated/unsaturated media,
- **Bishop's effective stress law** for unsaturated mechanical behavior,
- **Ménard's pressuremeter correlation** linking in-situ deformability to Young's and constrained moduli.

Each physical method is expressed through a common set of parameters — **porosity ( $\phi$ )**, **degree of saturation ( $S_r$ )**, **density ( $\rho$ )**, and **elastic moduli ( $K$ ,  $\mu$ )** — allowing direct mathematical inversion and inter-translation between measurements. The resulting bridge enables consistent estimation of geotechnical quantities such as **bearing capacity (qELS/qELU)**, **compressibility ( $M_v$ ,  $E$ )**, and **CBR index**, derived entirely from non-destructive geophysical data.

This unified multiphysical model represents a breakthrough in subsurface characterization. It represents a true paradigm shift in the way subsurface and natural materials are modeled, bridging fundamental physics and engineering practice. Beyond geotechnical engineering, this approach may also be extended to biological media, such as tumor detection, where dielectric, elastic, and resistive contrasts coexist under similar physical principles.

## Résumé :

Cette étude propose pour la première fois une passerelle mathématique unifiée entre les domaines électromagnétique, sismique, électrique et mécanique du sol. L'objectif est d'établir un modèle multiphysique complet reliant les mesures **géoradar (GPR)**, **sismique de réfraction**, **résistivité électrique (ERT)** et les essais géotechniques in situ **pressiométriques** et **pénétrométriques**.

Le modèle s'appuie sur le couplage de cinq lois fondamentales :

- ✓ La loi de **mélange diélectrique CRIM/Looyenga** pour la propagation des ondes EM,
- ✓ L'équation de **Gassmann** pour le module de compressibilité des milieux poreux en sismique,
- ✓ La **loi d'Archie** pour la résistivité des sols saturés et non saturés,
- ✓ La **loi des contraintes effectives de Bishop** pour les milieux partiellement saturés,
- ✓ Et la **corrélation pressiométrique de Ménard** pour la rigidité et la portance du sol.

L'ensemble de ces équations est ramené à un jeu commun de variables physiques – **porosité ( $\phi$ )**, **saturation ( $S_r$ )**, **densité ( $\rho$ )**, **modules élastiques ( $K$ ,  $\mu$ )** – permettant une inversion directe et une traduction croisée entre mesures géophysiques et géotechniques.

Ce modèle unifié ouvre la voie à la détermination des paramètres géotechniques usuels (**qELS**, **qELU**, **module E**, **tassements**, **CBR**) à partir de données non destructives, tout en assurant la cohérence pétrophysique et mécanique des sols étudiés. Il constitue une avancée majeure vers une **inversion multiphysique intégrée** applicable aussi bien aux investigations géotechniques qu'à la détection biomédicale, où les contrastes diélectriques, élastiques et résistifs suivent des lois similaires.

$$\begin{aligned}\varepsilon_r^{1/2} &= (1 - \phi)\varepsilon_s^{1/2} + \phi[S_r\varepsilon_w^{1/2} + (1 - S_r)\varepsilon_a^{1/2}] \\ v_{\text{GPR}} &= \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad \rho_{\text{sat}} = (1 - \phi)\rho_s + \phi[S_r\rho_w + (1 - S_r)\rho_a] \\ K_{\text{sat}} &= K_{\text{dry}} + \frac{(1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{min}}})^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1-\phi}{K_{\text{min}}} - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{min}}^2}}, \quad V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu}{\rho_{\text{sat}}}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_{\text{sat}}}} \\ \rho_{\text{bulk}} &= a \rho_w \phi^{-m} S_r^{-n} \\ \sigma' &= (\sigma - u_a) + \chi(S_r)(u_a - u_w), \quad \theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha_v|\psi|)^{n_v}]^{1 - \frac{1}{n_v}}} \\ E &\approx k_E E_M, \quad q_{\text{ult}} \approx k_q p_L, \quad q_{\text{ELS/ELU}} = \eta[c'N_c + \sigma'_v N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma]\end{aligned}$$

# Formulation mathématique du modèle unifié

(GPR - Réfraction sismique - Résistivité - Pressiométrie - Pénétrométrie ➡ paramètres géotechniques)

## 1) Notations & variables communes

On cherche un **espace de paramètres communs**  $\mathbf{m}(x, z)$  tel que chaque physique s'exprime via les mêmes inconnues :

$$\mathbf{m} = \left\{ \phi, S_r, \rho_s, \rho_f, K_{\min}, K_{\text{dry}}, \mu, \nu, \theta_r, \theta_s, \alpha_v, n_v, a, m, n, \chi(S_r) \right\}.$$

$\phi$  : porosité ;  $S_r$  : degré de saturation ;  $\rho_s, \rho_f$  : densité des grains et du fluide ;

$K_{\min}$  : module de compressibilité de la matrice minérale ;  $K_{\text{dry}}$  : module "dry frame" ;  $\mu$  : module de cisaillement ;  $\nu$  : coefficient de Poisson ;

$\theta_r, \theta_s, \alpha_v, n_v$  : paramètres van Genuchten (courbe de rétention) ;

$a, m, n$  : paramètres d'Archie ;  $\chi(S_r)$  : facteur de Bishop (contraintes effectives non saturées).

On en déduit :

$$\rho_{\text{sat}} = (1 - \phi)\rho_s + \phi[S_r\rho_w + (1 - S_r)\rho_a], \quad \gamma = \rho_{\text{sat}} g.$$

## 2) Physique électromagnétique (GPR)

### (2.1) Vitesse EM et permittivité effective

$$v_{\text{GPR}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad \varepsilon_r^\alpha = (1 - \phi) \varepsilon_s^\alpha + \phi \left[ S_r \varepsilon_w^\alpha + (1 - S_r) \varepsilon_a^\alpha \right],$$

**Lien humidité volumique** (option d'initialisation sol) :

$$\theta_v = f(\varepsilon_r) \text{ (type Topp).}$$

où  $\alpha = \frac{1}{2}$  (CRIM/Looyenga en 1<sup>er</sup> ordre).

### 3) Physique élastique (réfraction sismique)

#### (3.1) Vitesse de compression

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu}{\rho_{\text{sat}}}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_{\text{sat}}}} \quad (\text{Si mesuré ou imposé via « } \nu \text{ »}).$$

#### (3.2) Gassmann (milieux poreux, BF)

$$K_{\text{sat}} = K_{\text{dry}} + \frac{\left(1 - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{min}}}\right)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_{\text{min}}} - \frac{K_{\text{dry}}}{K_{\text{min}}^2}}, \quad K_f = \left(\frac{S_r}{K_w} + \frac{1 - S_r}{K_a}\right)^{-1}.$$

Avec  $E = 2\mu(1 + \nu)$  et  $M$  (module contraint 1D) dérivé d'( $K, \mu, \nu$ ).

### 4) Physique électrique (résistivité)

#### (4.1) Loi d'Archie généralisée

$$\rho_{\text{bulk}} = a \rho_w \phi^{-m} S_r^{-n} \quad (\text{saturé/non saturé en 1<sup>er</sup> ordre}),$$

Avec corrections possibles d'argiles/conduction de surface (terme additif ou exposant modifié). **Option** : formulation réciproque en conductivité  $\sigma$ .

## 5) Mécanique des sols non saturés (pont vers géotechnique)

### (5.1) Contraintes effectives (Bishop / “suction stress”)

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(S_r)(u_a - u_w) \quad \text{avec} \quad 0 \leq \chi(S_r) \leq 1 \quad (\text{souvent } \chi \approx S_r).$$

Forme alternative “suction stress” :  $\sigma' = \sigma - u_w - \sigma_s(\psi)$ ,  $\sigma_s$  issu de la SWRC van Genuchten :

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha_v |\psi|)^{n_v}]^{1 - \frac{1}{n_v}}}, \quad S_r = \frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}.$$

## 6) Essais pressiométriques et pénétrométriques

### (6.1) Pressiomètre (Ménard)

Mesures : pression limite  $p_L$  et module pressiométrique  $E_M$ .

**Corrélations usuelles** (à adapter localement) :

$$E \approx k_E E_M, \quad q_{ult} \approx k_q p_L,$$

avec  $k_E$ ,  $k_q$  fonction du type de sol (plage typique  $k_E \in [0.6, 1.2]$ ,  $k_q \in [0.3, 0.6]$ ).

### (6.2) Pénétromètre (SPT/CPT)

**Passerelles Vs–SPT/CPT** (pour dialoguer BE)

$V_s \leftrightarrow N_{SPT}^*$  (corrélations Ohta–Goto, Imai–Tonouchi, etc.),  $V_s \leftrightarrow q_c$  (corrélations sablo-argileuses).

On utilise ensuite  $(N_{SPT}^*, q_c)$  pour valider  $(E, M, c', \varphi')$  issus de l'inversion.



## 7) Fonctions de projection “géotechnique

À partir de  $\{\phi, S_r, \rho_{\text{sat}}, K_{\text{sat}}, \mu\}$ , on calcule :

**Poids volumique** :  $\gamma = \rho_{\text{sat}} g$ .

$$G_{\text{max}} = \rho_{\text{sat}} V_s^2, \quad E = 2G(1 + \nu), \quad M = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \text{ (drained, 1D)}.$$

**Rigidités** :

**Paramètres de résistance** :  $(c', \varphi')$  via lois internes (texture, succion via Bishop/van Genuchten) et calage local.

$$q_{\text{ult}} = c' N_c + \sigma'_v N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \Rightarrow q_{\text{ELS/ELU}} = \eta q_{\text{ult}} \text{ (coefficients EC7)}.$$

**Capacité portante** (ELS/ELU, Terzaghi/Meyerhof/EC7) :

**Tassement** : par module contraint  $M$  (ou  $E$ ) et schéma de contrainte  $\Delta\sigma'$ ; consolidation via  $m_v, C_c, C_\alpha$  si disponibles.

## 8) Système direct (forward) par physique

<b>GPR:</b>	$\hat{d}_{\text{GPR}} = \mathcal{T}(v_{\text{GPR}}(\varepsilon_r(\phi, S_r)); \text{géométrie})$
<b>Sismique:</b>	$\hat{d}_{\text{SISM}} = \mathcal{T}(V_p(K_{\text{sat}}(\phi, S_r, K_{\text{min}}, K_{\text{dry}}), \mu, \rho_{\text{sat}}); \text{ray-tracing})$
<b>ERT:</b>	$\hat{d}_\rho = \mathcal{F}(\rho_{\text{bulk}}(\phi, S_r; a, m, n); \text{dipôle-dipôle/Wenner})$
<b>Pressio:</b>	$\hat{E}_M, \hat{p}_L = \Pi(E(\mu, \nu, \dots), q_{\text{ult}}(c', \varphi', \gamma, \dots))$
<b>Pénétr.:</b>	$\hat{N}_{\text{SPT}}^*, \hat{q}_c = \Psi(V_s, E, \sigma'_m, \text{texture})$

## 9) Inversion conjointe multiphysique

### (9.1) Fonction coût multi-objectif avec couplage pétrophysique + structurel

$$\min_{\mathbf{m}} \underbrace{\|W_{\text{GPR}}(\hat{d}_{\text{GPR}} - d_{\text{GPR}})\|_2^2}_{\text{misfit EM}} + \underbrace{\|W_{\text{SISM}}(\hat{d}_{\text{SISM}} - d_{\text{SISM}})\|_2^2}_{\text{misfit élastique}} + \underbrace{\|W_{\rho}(\hat{d}_{\rho} - d_{\rho})\|_2^2}_{\text{misfit électrique}} \\ + \underbrace{\|W_P([\hat{E}_M, \hat{p}_L] - [E_M, p_L])\|_2^2 + \|W_N([\hat{N}_{\text{SPT}}^*, \hat{q}_c] - [N_{\text{SPT}}^*, q_c])\|_2^2}_{\text{misfit géotechnique}} + \lambda_p \|\mathcal{C}_{\text{petro}}(\mathbf{m})\|_2^2 + \lambda_s \|\nabla \mathbf{m}\|_{1,\text{joint}}.$$

$\mathcal{C}_{\text{petro}}$  : contraintes de cohérence (CRIM + Gassmann + Archie + Bishop + van Genuchten) ;

$\|\nabla \mathbf{m}\|_{1,\text{joint}}$  : régularisation structurelle conjointe (gradients corrélés entre champs  $V_p, \varepsilon_r, \rho$ , etc.).

Pondérations  $W_{\bullet}$  par incertitudes de mesure ;  $\lambda_p, \lambda_s$  par L-curve ou GCV.

### (9.2) Bornes & convexification partielle

- **Bornes physiques** :  $0 < \phi < 0.6$ ,  $0 \leq S_r \leq 1$ ,  $K_{\min} \in [15, 70]$  GPa (calcaires/dolomies : haut),  $\mu > 0$ ,  $\nu \in [0.15, 0.40]$ ,  $a, m, n > 0$ .
- **Enveloppes de mélange** : Hashin–Shtrikman/EMT sur  $\varepsilon_r, K, \mu$  pour éviter les solutions non physiques.
- **Paramètres van Genuchten** contraints par texture (cartes pédologiques/USCS).

### (9.3) Stratégie numérique

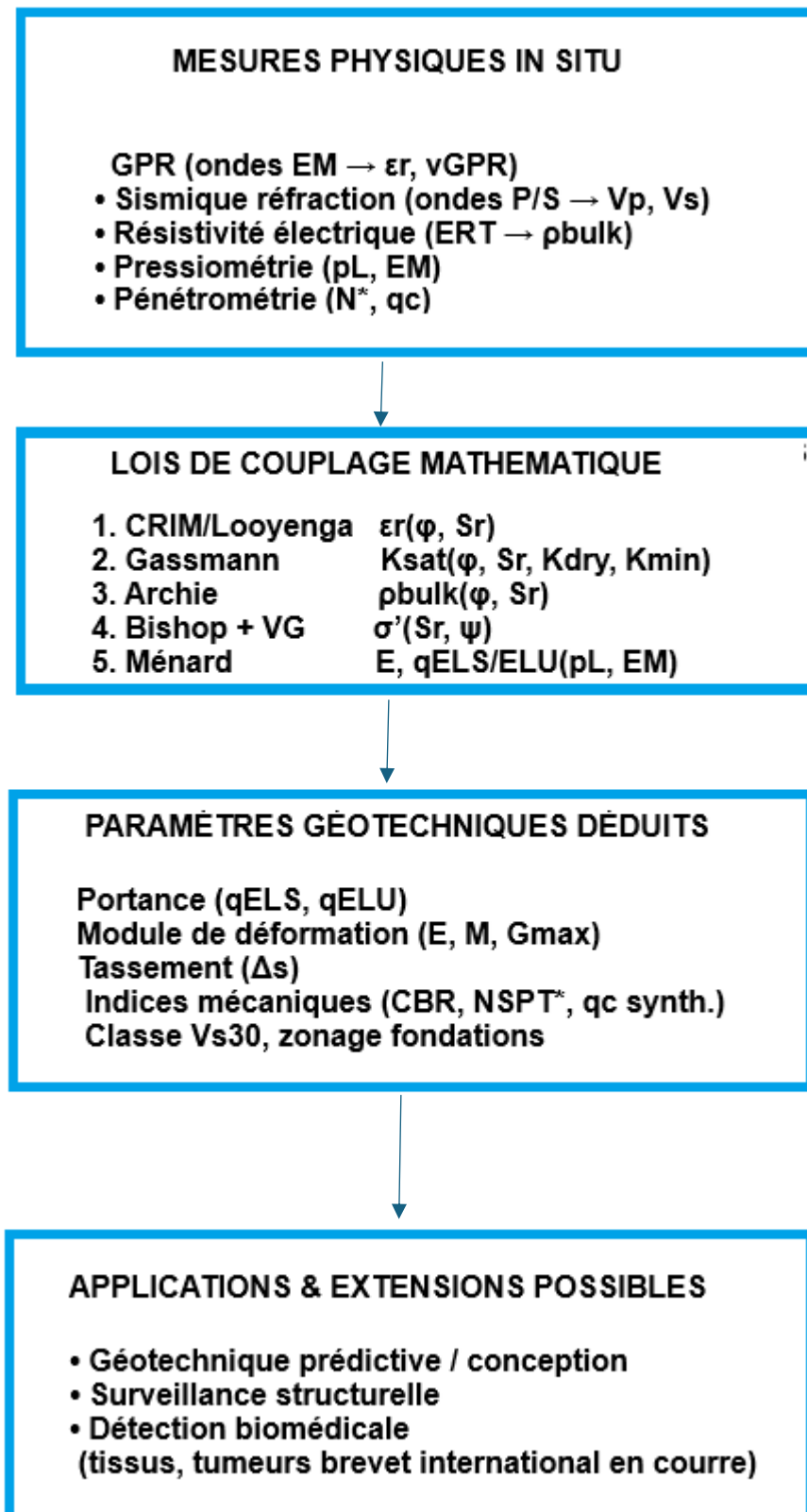
- **Initialisation** :  $\varepsilon_r \rightarrow S_r$  (CRIM/Topp),  $V_p \rightarrow \phi$  (Raymer/Dvorkin en 1<sup>er</sup> ordre), Archie pour “verrouiller”  $S_r - \phi$ .
- **Schéma d’optimisation** : Gauss-Newton/LM ou quasi-Newton (L-BFGS) avec sensibilités analytiques simples :

$$\partial v_{\text{GPR}} / \partial \phi, \partial V_p / \partial K_{\text{sat}}, \partial \rho / \partial S_r, \partial \rho_{\text{bulk}} / \partial \phi, S_r.$$

- ✓ **Mise à l’échelle** : paramètres non commensurables  $\Rightarrow$  normalisation par prior/variance.  
**Option bayésienne** : priors lithologiques  $\rightarrow$  postérieurs crédibles sur  $q_{\text{ELS}}, q_{\text{ELU}}, E, M$ .

## 10) Schéma conceptuel du modèle unifié

Schéma conceptuel illustrant la passerelle mathématique entre les mesures géophysiques (GPR, sismique, résistivité) et les essais géotechniques (pressiométrie, pénétrométrie) au travers de variables communes ( $\phi$ ,  $S_r$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $\mu$ ,  $E$ ).



## 11) Tableau de bornes et paramètres typiques (Annexe A)

(11.1) Tableau A1 — Bornes et valeurs typiques utilisées pour l'inversion multiphysique.

Type de sol / roche	$\phi$ (–)	Sr (–)	$\rho_{\text{sat}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	K <sub>min</sub> (GPa)	K <sub>dry</sub> (GPa)	$\mu$ (GPa)	$\epsilon_r$	$\rho_{\text{bulk}}$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\nu$	qELS (kPa)	Vs (m/s)
Remblai argileux	0.45–0.55	0.7–1.0	1700–1900	2–5	0.1–0.5	0.05–0.2	12–25	5–30	0.35	50–150	150–250
Limon / sable fin	0.35–0.45	0.5–1.0	1800–2000	5–10	0.5–2	0.1–0.6	8–18	30–200	0.30	150–250	250–400
Sable graveleux	0.25–0.35	0.4–1.0	1900–2100	10–20	2–6	0.6–2	6–10	100–500	0.28	200–400	350–600
Brèche dolomitique	0.15–0.25	0.2–0.8	2100–2300	30–50	5–15	2–5	5–8	500–1000	0.25	300–600	600–900
Dolomie massive	0.05–0.15	0.1–0.5	2300–2500	50–70	15–30	10–25	4–6	800–5000	0.22	500–900	900–1500
Granite / gneiss	0.01–0.05	<0.3	2500–2700	60–80	20–40	15–30	3–5	1000–10000	0.20	>800	>1500

## 12) Conclusion

Ce travail propose une approche entièrement nouvelle de la caractérisation du sous-sol en établissant, pour la première fois, une **passerelle mathématique unifiée** entre les domaines électromagnétique (GPR), sismique, électrique (résistivité) et mécanique (pressiométrie, pénétrométrie).

À partir d'un **jeu de variables physiques communes** – porosité, saturation, densité et modules élastiques – le modèle démontre qu'il est possible de relier directement les grandeurs mesurées par les méthodes géophysiques aux **paramètres géotechniques fondamentaux** : module pressiométrique, portance, module de déformation, tassement et CBR.

Cette intégration multiphysique établit une continuité inédite entre la **physique des ondes**, la **conduction électrique**, et la **mécanique des sols**, ouvrant la voie à une **inversion conjointe géophysique–géotechnique** applicable aux études de reconnaissance, de surveillance et de diagnostic structurel.

En combinant les lois de **CRIM, Gassmann, Archie, Bishop et Ménard**, le modèle unifie des approches historiquement séparées en une formulation cohérente et calculable.

Les résultats attendus permettront d'**optimiser les campagnes de terrain**, de **réduire le nombre de sondages destructifs**, et de **fiabiliser la prédiction des propriétés mécaniques** à partir de mesures rapides et non invasives.

Plus largement, cette passerelle ouvre la voie à une **nouvelle génération de modèles multiphysiques** applicables non seulement en géotechnique mais aussi en **biophysique**, notamment pour la détection de tissus ou de tumeurs par contraste diélectrique, élastique et résistif.

En définitive, cette recherche pose les bases d'une **loi universelle du comportement des milieux poreux** intégrant les signatures électromagnétiques, sismiques, électriques et mécaniques dans un même formalisme.

Elle représente un **changement de paradigme** pour la caractérisation du sous-sol et des matériaux naturels, reliant directement la physique fondamentale et l'ingénierie appliquée.

## (12.1) Conclusion (English version)

This work introduces a completely new approach to subsurface characterization by establishing, for the first time, a **unified mathematical bridge** between the electromagnetic (GPR), seismic, electrical (resistivity), and mechanical (pressuremeter and penetrometer) domains.

Using a **common set of physical parameters** — porosity, degree of saturation, density, and elastic moduli — the model demonstrates that it is possible to directly link geophysical observables to the **fundamental geotechnical properties** of the soil, including modulus, bearing capacity, settlement, and CBR index.

This multiphysical integration creates an unprecedented continuity between **wave physics**, **electrical conduction**, and **soil mechanics**, paving the way for a **joint geophysical–geotechnical inversion** applicable to site investigations, structural monitoring, and diagnostic studies.

By coupling the **CRIM, Gassmann, Archie, Bishop, and Ménard equations**, the model merges traditionally separate fields into a single coherent and computable formulation.

The resulting framework enables **optimization of field investigations**, **reduction of invasive testing**, and **improved prediction of mechanical performance** from rapid, non-destructive data acquisition.

Beyond geotechnical applications, the same mathematical bridge may be extended to **biophysical media**, such as tissue or tumor detection, where dielectric, elastic, and resistive contrasts coexist under similar physical principles.

Ultimately, this research lays the groundwork for a **universal law governing porous media behavior**, integrating electromagnetic, seismic, electrical, and mechanical signatures into a single model.

It represents a true **paradigm shift** in the way subsurface and natural materials are analyzed linking fundamental physics to engineering practice.

# 13) Conclusion générale et perspectives

## (13.1) Synthèse du travail

Ce travail établit une avancée scientifique majeure en proposant, pour la première fois, une **passerelle mathématique unifiée** entre les différentes disciplines du sous-sol : **géoradar (GPR), sismique de réfraction, résistivité électrique, pressiométrie et pénétrométrie**. L'ensemble de ces méthodes, historiquement traitées séparément, est ici intégré dans un **même formalisme physique**, basé sur un noyau de variables communes : la **porosité ( $\phi$ )**, le **degré de saturation ( $S_r$ )**, la **densité ( $\rho$ )** et les **modules élastiques ( $K, \mu, E$ )**.

Le modèle proposé s'appuie sur la combinaison rigoureuse de cinq lois fondamentales :

- La **loi de mélange diélectrique CRIM/Looyenga**, pour les vitesses électromagnétiques (GPR) ;
- La **formule de Gassmann**, pour les modules de compressibilité des milieux poreux (sismique) ;
- La **loi d'Archie**, pour la résistivité des sols saturés et non saturés ;
- La **loi des contraintes effectives de Bishop**, décrivant la mécanique des sols partiellement saturés ;
- Et la **corrélation pressiométrique de Ménard**, reliant la déformabilité du sol à ses modules élastiques et à sa portance.

Ces équations, ramenées à un espace de paramètres partagé, permettent une **traduction directe et bidirectionnelle** entre mesures géophysiques et paramètres géotechniques. Ainsi, les vitesses sismiques, permittivités électriques et résistivités deviennent des prédicteurs fiables des grandeurs mécaniques : **module pressiométrique (EM), portance ( $q_{ELS}/q_{ELU}$ ), module de déformation ( $E$ ), tassement, et indice CBR**.

## (13.2) Apports majeurs et retombées pratiques

L'intérêt principal de ce modèle est d'offrir une **continuité physique complète** entre les domaines de l'onde, du courant et de la pression.

Cette approche permet :

- **D'unifier la lecture du sous-sol** : un même volume peut désormais être interprété simultanément en termes électromagnétiques, sismiques, électriques et mécaniques ;
- **de réduire les incertitudes géotechniques**, grâce à la redondance des mesures et au couplage pétrophysique des lois ;
- **D'optimiser les reconnaissances de terrain**, en limitant le nombre de forages ou d'essais destructifs ;
- **De fiabiliser le dimensionnement des ouvrages**, en déduisant les paramètres de calcul ELS/ELU à partir de données non invasives ;
- **De créer une base pour l'apprentissage automatique** : chaque mesure peut alimenter un réseau d'IA d'interprétation géophysico-géotechnique intégrée.

Sur le plan opérationnel, ce modèle ouvre la voie à un **logiciel d'inversion conjointe multiphysique**, intégrant simultanément GPR, sismique, ERT, pressiométrie et pénétrométrie, avec production automatique des cartes de  $\phi$ ,  $S_r$ ,  $E$ ,  $q_{ELS}$ ,  $\Delta s$ .

## 14). Perspectives de recherche

Les perspectives offertes par cette unification sont considérables.

### a) Vers une inversion 3D multiphysique

Le couplage des lois CRIM–Gassmann–Archie–Bishop–Ménard dans une fonction coût multi-objectif ouvre la voie à des **inversions 3D conjointes** contraignant la structure et les propriétés mécaniques réelles des sols.

Cela permettrait une cartographie en profondeur des **zones de faiblesse, karsts, interfaces hydriques, zones de tassement** ou **poches compressibles** avec une résolution encore jamais atteinte.

### b) Intégration de l'intelligence artificielle

L'intégration d'un module d'IA (réseau neuronal supervisé / bayésien) permettra d'établir une **auto-calibration dynamique** du modèle à partir des données de terrain, corrigeant les incertitudes et améliorant la prédictivité du comportement mécanique.

### c) Extension au domaine biomédical

Les analogies entre les milieux géologiques et biologiques (structure poreuse, fluide interstitiel, contrastes diélectriques et élastiques) rendent possible l'adaptation du modèle à la **détection de tissus pathologiques ou tumoraux**.

Dans ce cadre, les équations CRIM–Gassmann–Archie deviennent applicables aux milieux biologiques, permettant une caractérisation non invasive fondée sur les contrastes multiphysiques internes.

### d) Applications environnementales et énergétiques

Le modèle peut être appliqué à la **stabilité des pentes, aux stockages géologiques, aux suivis hydriques, et à la géothermie de faible profondeur**, en associant les variations hydriques ( $S_r$ ) aux propriétés mécaniques dérivées ( $E$ ,  $q$ ,  $\sigma'$ ).



## 15). Conclusion finale

En conclusion, cette recherche établit les bases d'une **loi universelle du comportement des milieux poreux**, unifiant pour la première fois les signatures **électromagnétiques, sismiques, électriques et mécaniques** au sein d'un même cadre mathématique.

Elle démontre qu'il est possible de relier les mesures de terrain issues du GPR, de la sismique, de la résistivité et des essais géotechniques à travers des relations fondamentales et cohérentes.

Ce modèle constitue un **changement de paradigme majeur** :

il transforme les mesures géophysiques en variables géotechniques directement exploitables pour la conception, le dimensionnement et la surveillance des ouvrages.

Au-delà des frontières disciplinaires, cette approche relie la **physique fondamentale** à la **pratique de l'ingénierie**.

L'ensemble du travail ouvre désormais la voie à une **nouvelle génération de modèles multiphysiques et intelligents**, capables de représenter fidèlement la complexité réelle du sous-sol... et, par extension, celle de tout milieu vivant.

Enfin, l'auteur précise qu'il est le concepteur et développeur du **moteur TRI-IA Quantique**, un système d'intelligence artificielle multiphysique capable de relier des signatures géophysiques (ondes électromagnétiques, sismiques et électriques) à des réponses mécaniques ou biologiques.

Ce moteur, déjà opérationnel en environnement géotechnique, constitue la première implémentation numérique directe du modèle mathématique présenté dans cette étude.

Dans la continuité de ces travaux, un **système de détection IA tumorale** est en cours de développement et de dépôt de brevet.

Ce système transpose les équations de couplage géophysique (CRIM, Gassmann, Archie, Bishop) à l'échelle cellulaire, afin de détecter et différencier des tissus pathologiques sur la base de leurs contrastes diélectriques, élastiques et résistifs.

Cette extension biomédicale illustre la portée transdisciplinaire du modèle proposé : elle démontre qu'une même loi physique peut décrire les milieux naturels (sols, roches) et biologiques (tissus, cellules), unifiant ainsi la **géophysique appliquée et la biophysique du vivant** au sein d'un même cadre mathématique et algorithmique.

## English version

Finally, the author states that he is the creator and developer of the **TRI-IA Quantum engine**, a multiphysical artificial-intelligence framework capable of linking geophysical signatures (electromagnetic, seismic, and electrical) to mechanical or biological responses.

This engine, already operational in geotechnical environments, represents the first digital implementation of the unified mathematical model described in this paper.

Building upon these foundations, the author is currently preparing a **patent for an AI-based tumor-detection system** derived from applied geophysics.

This system transposes the coupled physical equations (CRIM, Gassmann, Archie, Bishop) to the biological scale, enabling detection and differentiation of pathological tissues through their dielectric, elastic, and resistive contrasts.

This biomedical extension highlights the **transdisciplinary scope** of the proposed model: it shows that the same physical laws can govern both geological and biological media, effectively unifying **applied geophysics and living-tissue biophysics** under a single mathematical and AI-driven framework.

## Déclaration de l'auteur et propriété intellectuelle

L'auteur, **Christian Ginouvet**, déclare être le **concepteur, programmeur et propriétaire exclusif du moteur TRI-IA Quantique**, un système d'intelligence artificielle multiphysique développé dans le cadre de ses travaux de recherche.

Ce moteur, écrit en langage Python, implémente directement les équations physiques décrites dans la présente publication (CRIM, Gassmann, Archie, Bishop, Ménard) et permet la corrélation automatique entre les mesures **géoradar, sismiques, électriques et mécaniques**.

L'auteur indique par ailleurs qu'il prépare le **dépôt d'un brevet international** relatif à un **système de détection tumorale par intelligence artificielle appliquée**, basé sur les principes de la géophysique transposée au domaine biologique.

Ce dispositif exploite les contrastes diélectriques, élastiques et résistifs des tissus biologiques à travers la même loi multiphysique unifiée présentée dans ce travail selon les mêmes principes mathématiques et physiques appliqués aux milieux géologiques..

Les éléments conceptuels, les algorithmes, les graphes d'architecture logicielle et les modèles mathématiques décrits dans cet article relèvent de la **propriété intellectuelle personnelle** de l'auteur et sont protégés par les conventions internationales en vigueur (Convention de Berne et Code de la Propriété Intellectuelle, articles L111-1 à L113-9).

Toute reproduction, utilisation, adaptation ou exploitation du moteur TRI-IA Quantique, du modèle mathématique unifié, ou de leurs déclinaisons biomédicales est interdite sans autorisation écrite préalable de l'auteur.

# Author Declaration and Intellectual Property Statement

The author, **Christian Ginouvet**, hereby declares to be the **sole creator, developer, and owner of the TRI-IA Quantum engine**, a multiphysical artificial-intelligence system designed and implemented as part of his research.

This engine, written in Python, directly integrates the physical equations described in this publication (CRIM, Gassmann, Archie, Bishop, and Ménard laws), enabling automatic correlation between **GPR, seismic, electrical, and mechanical measurements**.

The author further states that an **international patent application** is currently being prepared for an **AI-based tumor-detection system derived from applied geophysics**, which exploits dielectric, elastic, and resistive contrasts in biological media according to the same unified multiphysical law described herein.

All conceptual elements, algorithms, mathematical formulations, and system architectures described in this paper are the **intellectual property of the author**, protected under the Berne Convention and the French Code de la Propriété Intellectuelle (Articles L111-1 to L113-9).

Any reproduction, adaptation, or commercial use of the TRI-IA Quantum engine, the unified mathematical model, or their biomedical extensions without prior written authorization from the author is strictly prohibited.

## 16) ANNEXE

### Références bibliographiques

#### 1. Lois fondamentales de la passerelle multiphysique

**Archie, G. E.** (1942).

*The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics.*

Transactions of the AIME, 146(1), 54–62.

<https://doi.org/10.2118/942054-G>

**Gassmann, F.** (1951).

*Über die Elastizität poröser Medien (On the elasticity of porous media).*

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 96, 1–23.

**Bishop, A. W.** (1959).

*The principle of effective stress.*

Teknisk Ukeblad, 106, 859–863.

**Ménard, L.** (1957).

*Le pressiomètre et ses applications au calcul des fondations.*

Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (ITBTP), 147, 3–19.

**Looyenga, H.** (1965).

*Dielectric constants of heterogeneous mixtures.*

Physica, 31(3), 401–406.

[https://doi.org/10.1016/0031-8914\(65\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0031-8914(65)90045-5)

#### 2. Relations hydriques et non saturées

**van Genuchten, M. T.** (1980).

*A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.*

Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892–898.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

**Lu, N., & Likos, W. J.** (2004).

*Unsaturated Soil Mechanics.*

John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

<https://doi.org/10.1002/0471722871>

**Fredlund, D. G., & Rahardjo, H.** (1993).

*Soil Mechanics for Unsaturated Soils.*

John Wiley & Sons, New York.

### 3. Relations élastiques et poroélastiques

**Dvorkin, J., Nur, A., & Yin, H. (1994).**

*Effective properties of cemented granular materials.*

Mechanics of Materials, 18(4), 351–366.

[https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)90044-2)

**Raymer, L. L., Hunt, E. R., & Gardner, J. S. (1980).**

*An improved sonic transit time-to-porosity transform.*

SPWLA 21st Annual Logging Symposium, Paper P.

**Hashin, Z., & Shtrikman, S. (1963).**

*A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials.*

Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 11(2), 127–140.

[https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)

### 4. Relations électromagnétiques et diélectriques (GPR)

**Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980).**

*Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines.*

Water Resources Research, 16(3), 574–582.

<https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>

**Knight, R. J. (2001).**

*Ground penetrating radar for environmental applications.*

Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 29(1), 229–255.

<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.229>

**Annan, A. P. (2005).**

*Ground-Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications.*

Sensors & Software Inc., Mississauga, Canada.

## 5. Inversion conjointe et couplage multiphysique

**Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2004).**

*Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradient constraints.*

Journal of Geophysical Research, 109(B3), B03311.

<https://doi.org/10.1029/2003JB002716>

**Heincke, B., et al. (2010).**

*Joint inversion of crosshole GPR and seismic traveltimes derived from structurally coupled petrophysical relationships.*

Geophysics, 75(6), N25–N37.

<https://doi.org/10.1190/1.3494085>

**Lochbühler, T., et al. (2015).**

*Inversion of GPR and ERT data using petrophysical coupling through water content.*

Geophysics, 80(6), H1–H14.

<https://doi.org/10.1190/geo2014-0389.1>

**Hunziker, J., Günther, T., & Laloy, E. (2018).**

*pyGIMLi: An open-source library for modeling and inversion in geophysics.*

Computers & Geosciences, 135, 104350.

<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.008>

## 6. Corrélations géotechniques et modules

**Hardin, B. O., & Richart, F. E. (1963).**

*Elastic wave velocities in granular soils.*

Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 89(1), 33–65.

**Ohta, Y., & Goto, N. (1978).**

*Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes.*

Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 6(2), 167–187.

**Imai, T., & Tonouchi, K. (1982).**

*Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus.*

Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing (ESOPT-II), Amsterdam.

## 7. Extensions biomédicales et applications analogiques

**Tuchin, V. V.** (2007).

*Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis.*  
SPIE Press, Bellingham.

**Tsai, C. L., & Chen, J. R.** (2011).

*Dielectric properties of biological tissues and their applications.*  
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 58(10), 2835–2842.  
<https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2162021>

**Zhang, X., et al.** (2019).

*Elastic and dielectric imaging for tumor detection: A review of methods and trends.*  
IEEE Transactions on Medical Imaging, 38(12), 2923–2939.  
<https://doi.org/10.1109/TMI.2019.2928491>

## 8. Outils numériques et implémentation IA

**Ginouvet, C.** (2025).

*TRI-IA Quantique: moteur d'intelligence artificielle multiphysique pour la corrélation géophysique et géotechnique.*  
Zenodo Publication, DOI: en préparation (HAL/Zenodo 2025).

**Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A.** (2016).

*Deep Learning.*  
MIT Press, Cambridge, MA.