



GEOSOL STUDIO

REFERENCE BOOK

*Fondements scientifiques, méthodologiques et normatifs
de la modélisation géotechnique et géologique 3D*

Mouhamed NIANG

*Ingénieur Génie Civil
École Polytechnique de Thiès*

Dr. Cheikh Sadibou FAYE

*Enseignant-chercheur en Géomatique-Topographie
École Polytechnique de Thiès*

Première édition 2026

PRÉFACE

Cet ouvrage rassemble, dans un cadre unifié, les fondements scientifiques et normatifs qui structurent la pratique contemporaine de l'investigation et de la modélisation géotechniques : la géostatistique appliquée à la reconnaissance des sols, l'essai pressiométrique Ménard, les cinq grandes familles d'essais de laboratoire, le dimensionnement des fondations selon l'Eurocode 7, et les méthodes de validation scientifique des modèles numériques du sous-sol.

Il ne décrit ni un produit, ni une technologie : il décrit une méthode. Chaque chapitre peut être lu indépendamment et constitue, à lui seul, une synthèse pédagogique d'un domaine de la géotechnique appliquée, illustrée par des cas réels conduits en Afrique de l'Ouest. L'ouvrage s'adresse autant à l'étudiant ingénieur découvrant la discipline qu'au praticien expérimenté cherchant une référence structurée pour fonder ses choix méthodologiques.

Le contexte qui a motivé ce travail est documenté et préoccupant : au Sénégal, 1 446 bâtiments menaçant ruine ont été recensés en 2021, dont 627 dans la seule région de Dakar [\[1\]](#). La Direction de la Construction et de l'Habitat dénombre au moins seize victimes d'effondrements entre 2024 et 2025. Ces sinistres trouvent fréquemment leur origine dans une connaissance insuffisante des conditions de sol non par négligence des praticiens, mais par l'absence d'outils et de référentiels adaptés au contexte géologique, climatique et économique de la sous-région. C'est cette lacune que le présent ouvrage entend combler, en rendant accessibles et rigoureusement justifiées des méthodes dont la maîtrise conditionne directement la sécurité des ouvrages et des populations.

Les auteurs

Table des matières

PRÉFACE	3
L'investigation géotechnique en contexte ouest-africain	14
1.1 Le rôle de la reconnaissance des sols dans la sécurité des ouvrages	14
1.2 Quatre lacunes structurelles	14
Principe directeur de cet ouvrage	15
1.3 Spécificités géologiques de l'Afrique de l'Ouest	15
1.4 Le cadre normatif international et la question de son adaptation	16
1.5 Le coût de l'inaction : un raisonnement économique simple	16
1.6 Structure de l'ouvrage et logique de lecture	17
1.7 Le rôle du jugement d'ingénieur dans une démarche quantifiée	17
1.8 Lecture comparée avec d'autres régions en développement	17
1.9 Acteurs concernés par cet ouvrage	18
1.10 Limites du périmètre couvert	18
1.11 Pourquoi un ouvrage et non une succession d'articles	18
1.12 Note sur l'usage des références bibliographiques	19
1.13 Synthèse de la partie	19
Principes de gestion intégrée de la donnée géotechnique	19
2.1 Géolocalisation et référencement spatial	20
2.2 Standardisation des données de sondage	20
2.3 Traçabilité et qualité de la donnée	21
2.4 De la donnée individuelle au patrimoine de connaissance collectif	21
Principe de gestion de la donnée	22
2.5 Champs minimaux d'un enregistrement de sondage	22
2.6 De la collecte à la décision : une chaîne sans rupture	22
2.7 Propriété et confidentialité de la donnée	23
2.8 Sécurité et intégrité de la donnée numérique	23
2.9 Interopérabilité des formats de stockage	23
2.10 Synthèse de la partie	24
Fondements de la géostatistique appliquée à la géotechnique	26
3.1 De l'interpolation naïve à l'estimation probabiliste	26
3.2 Le variogramme : mesure de la corrélation spatiale	26
3.3 Le krigeage : estimateur linéaire à variance minimale	27
Pondération par l'épaisseur des strates	27
3.4 Anisotropie : la continuité n'est pas la même dans toutes les directions	27

3.5 Exemple illustratif d'ajustement	28
Krigeage d'indicateur pour la modélisation 3D multi-lithologique	29
4.1 Principe de la variable indicatrice	29
4.2 De la carte déterministe à la carte de risque	29
4.3 Domaine d'application.....	29
4.4 Le problème du lissage et ses corrections	30
4.5 Nombre de lithologies et complexité computationnelle	30
4.6 Restitution visuelle du modèle d'indicateur	30
4.7 Choix de la résolution de la grille voxel	31
Krigeage des surfaces de contact pour géologies stratifiées	31
5.1 Principe et critère de choix méthodologique	31
5.2 Validation sur des contextes géologiques contrastés.....	32
5.3 Livrables dérivés du modèle de contact	32
5.4 Gestion des inversions et des biseaux	32
5.5 Articulation avec le krigeage d'indicateur	32
Validation des modèles : la méthode Leave-One-Out	33
6.1 Pourquoi valider un modèle géostatistique	33
6.2 Indicateurs de fiabilité.....	33
6.3 Un point de vigilance méthodologique : les contacts ambigus	34
Point de vigilance.....	34
6.4 De l'indicateur statistique à la décision d'ingénierie	34
6.5 Exemple illustratif de lecture des résultats	34
6.6 Optimisation de la densité d'investigation : apports de la littérature	35
6.7 Fréquence de réévaluation du modèle	35
6.8 Validation croisée et responsabilité documentée	35
6.9 Synthèse de la partie : du point de mesure au modèle validé	36
Théorie et pratique de l'essai pressiométrique.....	38
7.1 Principe de l'essai	38
7.2 Paramètres mesurés	38
7.3 Le rapport EM/PI* : un indicateur de structure.....	38
7.4 Protocole d'exécution et points de vigilance	39
7.5 Position de l'essai pressiométrique parmi les essais in situ	39
7.6 Profondeur, espacement et programme d'essai	39
7.7 Corrections et sources d'erreur usuelles	40
7.8 Optimisation et instrumentation moderne	40
7.9 Comparabilité inter-sites et effet opérateur	40

7.10 Choix du nombre d'essais par sondage.....	41
7.11 Interprétation en présence de discontinuités structurales	41
7.12 Place de l'essai dans le programme normatif complet.....	41
7.13 Conditions de site et accessibilité de l'équipement.....	42
7.14 Sécurité et qualification des opérateurs	42
7.15 Synthèse du chapitre	42
Interpolation spatiale des paramètres mécaniques.....	43
8.1 De la mesure ponctuelle à la caractérisation continue.....	43
8.2 Justification scientifique de la réduction du nombre de sondages	43
8.3 Représentation graphique : la coupe pressiométrique	43
8.4 Spécificités de l'interpolation des grandeurs mécaniques.....	43
8.5 Exemple illustratif.....	44
8.6 Validation croisée des grandeurs mécaniques interpolées.....	44
8.7 Continuité avec le modèle géologique	45
8.8 Extraction ponctuelle pour le dimensionnement	45
8.9 Synthèse de la chaîne pressiométrique	45
8.10 Cartographie comparée de plusieurs sites.....	45
8.11 Sensibilité du dimensionnement à la qualité de l'interpolation	46
8.12 Recommandations de synthèse	46
8.13 Anisotropie mécanique et orientation des ouvrages.....	47
8.14 Vers une base de données mécaniques régionale	47
8.15 Synthèse de la partie	47
8.16 Check-list avant exploitation pour le dimensionnement	47
Limites d'Atterberg et identification des sols.....	50
9.1 Principe et protocole normatif.....	50
9.2 Indices dérivés et classification.....	50
Application aux argiles tropicales.....	50
9.3 Sensibilité du protocole et reproductibilité	51
9.4 Lien avec le potentiel de gonflement	51
9.5 Insertion dans la chaîne de caractérisation	51
Analyse granulométrique	52
10.1 Détermination de la distribution granulométrique	52
10.2 Diamètres caractéristiques et coefficients dérivés.....	52
10.3 Application aux formations sablo-carbonatées côtières	53
10.4 Articulation avec la classification USCS complète.....	53
Essai œdométrique et théorie de la consolidation.....	53

11.1 Principe de l'essai et courbe de compressibilité	53
11.2 Indices de compressibilité et de gonflement.....	54
11.3 La pression de préconsolidation : construction de Casagrande.....	54
11.4 Durée de l'essai et consolidation secondaire.....	54
11.5 Exploitation pratique de la courbe de compressibilité	55
11.6 Remaniement de l'échantillon et précautions de prélèvement	55
11.7 Synthèse des indices de compressibilité par horizon	55
11.8 Nombre de paliers et qualité de la définition du coude	55
Essai de cisaillement direct	56
12.1 Principe de l'essai	56
12.2 Le critère de Mohr-Coulomb.....	56
12.3 Limites de l'essai et essais complémentaires	56
12.4 Cohésion apparente et cohésion effective	57
12.5 Préparation et représentativité de l'échantillon.....	57
12.6 Vitesse de cisaillement et conditions drainées	57
Essai de gonflement libre	58
13.1 Principe et protocole	58
13.2 Potentiel de gonflement et implications pour la conception	58
13.3 Minéralogie argileuse et amplitude du gonflement.....	58
13.4 Dispositions constructives associées	59
13.5 Synthèse de la partie : cinq essais, une caractérisation complète	59
13.6 Programme d'essais minimal recommandé	59
Le cadre de l'Eurocode 7	62
14.1 Principes généraux	62
14.2 Catégories géotechniques et niveau d'investigation	62
14.3 Coefficients partiels et approches de calcul	62
14.4 États-limites de service et critère de déformation	63
14.5 Méthodes prescriptives et méthodes de calcul	63
14.6 Synthèse du cadre normatif retenu dans cet ouvrage	63
14.7 Statut réglementaire dans les différents États de l'UEMOA	63
Fondations superficielles par la méthode pressiométrique.....	64
15.1 Domaine d'application	64
15.2 Capacité portante	64
15.3 Alimentation du calcul par le modèle 3D.....	65
15.4 Exemple illustratif de calcul.....	65
15.5 Radiers et interaction sol-structure.....	65

15.6 Semelles filantes sur sol hétérogène	65
15.7 Vérification au glissement et charges horizontales	66
Fondations profondes par la méthode pressiométrique	66
16.1 Domaine d'application	66
16.2 Résistance de pointe et frottement latéral	66
16.3 Choix entre solutions superficielles, semi-profondes et profondes	67
16.4 Frottement négatif et effet de groupe	67
16.5 Vérification de l'ancrage par le modèle 3D	67
16.6 Essais de chargement et calibration in situ	68
16.7 Synthèse de la partie : du paramètre mesuré à l'ouvrage dimensionné	68
Calcul des tassements de consolidation	68
17.1 La théorie de la consolidation	68
17.2 Trois régimes selon l'état de consolidation	69
Sol normalement consolidé ($\sigma'_p \leq \sigma'_{v0}$)	69
Sol surconsolidé, domaine élastique ($\sigma'_f \leq \sigma'_p$)	69
Sol surconsolidé avec dépassement de σ'_p ($\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_f$)	69
Point de vigilance : ne jamais appliquer C_c par défaut	69
17.3 Exemple illustratif	69
17.4 Tassement total et tassement différentiel	70
17.5 Tassements de fondations profondes	70
17.6 Limites du modèle unidimensionnel	71
17.7 Tassement et programmation des contrôles	71
17.8 Synthèse des facteurs déterminants du tassement	71
Représentation des coupes géologiques	74
18.1 Coupe brute et coupe interpolée	74
18.2 Précautions d'interprétation	74
Point de vigilance : la coupe interpolée n'est pas une mesure	74
18.3 Conventions graphiques et lisibilité	74
18.4 La coupe pressiométrique comme complément	75
18.5 Choix du tracé de coupe	75
18.6 Coupes multiples et couverture du site	75
18.7 Export et archivage des coupes	75
18.8 Synthèse du chapitre	76
Analyse volumétrique et cubature	76
19.1 Du modèle 3D au calcul de volumes	76
19.2 Applications pratiques	76

19.3 Incertitude volumétrique et propagation de la variance	76
19.4 Cubature et compensation déblai-remblai	77
19.5 Cubature et phasage des terrassements	77
19.6 Précision attendue et comparaison aux méthodes traditionnelles	77
19.7 Cubature et négociation contractuelle	78
19.8 Limites de l'approche volumétrique automatisée	78
Interopérabilité avec les environnements BIM et SIG	78
20.1 La continuité numérique entre investigation et conception	78
20.2 Fermer la boucle entre géotechnique et conception architecturale	79
20.3 État de la normalisation des échanges géotechniques	79
20.4 Limites actuelles et prudence d'usage	79
20.5 Export des volumes et des formations	80
20.6 Maturité organisationnelle requise	80
Structuration du rapport géotechnique	80
21.1 Fonction du rapport dans la chaîne de décision	80
21.2 Traçabilité du raisonnement géotechnique	81
21.3 Communiquer l'incertitude sans la dissimuler	81
21.4 Structure type d'un rapport géotechnique complet	81
21.5 Le rapport comme document vivant	82
21.6 Restitution adaptée aux différents destinataires	82
21.7 Archivage de long terme et accessibilité future	82
21.8 Synthèse de la partie	83
21.9 Transition vers l'intelligence artificielle et la normalisation régionale	83
21.10 Check-list de clôture du rapport	83
L'assistance par IA ancrée en pratique géotechnique	86
22.1 Un cadre conceptuel : l'ancrage (grounding)	86
22.2 Risques d'un usage non ancré	86
Point de vigilance	86
22.3 L'IA comme copilote, non comme autorité de calcul	86
22.4 Architecture conceptuelle d'une assistance ancrée	87
22.5 Cas d'usage représentatifs	87
22.6 Filiation avec les systèmes experts et apport spécifique	88
22.7 Limites persistantes et vigilance nécessaire	88
22.8 Responsabilité professionnelle et cadre déontologique	88
22.9 Conditions d'une adoption raisonnée	89
22.10 Perspectives	89

22.11 Exigences de mise à jour du corpus normatif	89
22.12 Exemple illustratif d'usage encadré	90
22.13 Capitalisation des documents existants	90
22.14 Coût, accessibilité et équité d'accès	91
22.15 Formation des jeunes ingénieurs à un usage critique	91
22.16 Multimodalité et documents hétérogènes	91
22.17 Indicateurs de suivi de la qualité de l'assistance	92
22.18 Synthèse du chapitre	92
22.19 Articulation avec l'enseignement de la géotechnique	92
22.20 Une discipline en construction	93
22.21 Articulation avec le reste de l'ouvrage	93
22.22 Tableau récapitulatif des bonnes pratiques	93
22.23 Mot de transition vers la normalisation régionale	94
22.24 Glossaire spécifique au chapitre	94
22.25 Conclusion de la partie	95
22.26 Pour aller plus loin	95
22.27 Récapitulatif des paragraphes du chapitre	95
Implications pour la pratique géotechnique en zone UEMOA	98
23.1 L'absence actuelle de référentiel régional	98
23.2 De l'accumulation de validations à la norme	98
23.3 Une contribution disponible aux institutions régionales	98
23.4 Précédents internationaux de construction de référentiels	98
23.5 Une méthodologie de constitution progressive	99
23.6 Acteurs et gouvernance d'une telle démarche	99
23.7 Risques d'une normalisation prématurée	100
Point de vigilance	100
23.8 Le rôle de chaque bureau d'études dans la démarche	100
23.9 Vers une feuille de route	100
23.10 Indicateurs candidats pour un référentiel régional	101
23.11 Portée pédagogique de la démarche	101
23.12 Comparaison avec d'autres filières d'infrastructure normalisée	102
23.13 Articulation avec les organismes existants	102
23.14 Un appel à la collaboration scientifique	102
23.15 Indicateurs de suivi de la démarche elle-même	103
23.16 Anticiper la révision périodique du référentiel	103
23.17 Mot de conclusion de la partie	103

23.18 Le coût de la non-donnée	104
23.19 Rôle des revues et conférences régionales	104
23.20 Mot final	104
23.21 Calendrier indicatif	105
23.22 Ce que cet ouvrage ne prétend pas accomplir seul	105
23.23 Articulation de ce chapitre avec les méthodes exposées	105
23.24 Remerciements et perspective d'édition future	106
23.25 Récapitulatif des chapitres de cet ouvrage	106
23.26 Dernier mot	107
23.27 Glossaire spécifique au chapitre	107
23.28 Conclusion générale de l'ouvrage.....	107
ANNEXES	109
Annexe A Fiche standardisée d'enregistrement de sondage géotechnique	110
A.1 Sondage : identification et localisation	110
A.2 Sondage : description stratigraphique	111
A.3 Essai pressiométrique Ménard fiche de coordonnées	112
A.4 Essai pressiométrique Ménard fiche de résultats	113
A.5 Essais de laboratoire limites d'Atterberg	114
A.6 Essais de laboratoire granulométrie	115
A.7 Essai de cisaillement direct enveloppe de Mohr-Coulomb.....	116
A.8 Essai de gonflement libre fiche de résultats	116
Annexe B GeoSol Studio : présentation des modules fonctionnels	118
B.1 Interface principale de GeoSol Studio.....	118
B.2 Définition interactive de l'axe de coupe géologique sur la carte	119
B.3 Coupe géologique brute.....	120
B.4 Coupe géologique interpolée par krigeage d'indicatrice	121
B.5 Ajustement du variogramme expérimental	122
B.6 Paramètres du krigeage d'indicatrices	123
B.7 Validation croisée Leave-One-Out (LOO)	124
B.8 Calcul de cubature	125
B.9 Convertisseur pressiométrique	126
B.10 Fondations superficielles (GS-Surf).....	127
B.11 Fondations semi-profondes (GS-Semi)	127
B.12 Fondations profondes (GS-Pleu).....	128
B.13 Copilote GeoSol AI.....	129
Annex C Executive Summary	130

Context	130
Scope	130
Key Methodological Contributions	130
Structure	131
Target Audience	131
Glossaire	132
Référentiel normatif applicable	133
Références bibliographiques	134

PARTIE I : Fondements de l'ingénierie géotechnique numérique

L'investigation géotechnique en contexte ouest-africain

1.1 Le rôle de la reconnaissance des sols dans la sécurité des ouvrages

Toute construction repose, au sens propre, sur une hypothèse : celle que le sol en place est capable de transmettre les charges de l'ouvrage sans déformation excessive ni rupture. Cette hypothèse n'a de valeur que si elle est vérifiée par une reconnaissance géotechnique adaptée à la nature de l'ouvrage, à son emprise et à la variabilité du sous-sol. L'Eurocode 7 (NF EN 1997-1) [\[2\]](#) formalise ce principe en exigeant que tout projet géotechnique soit rattaché à une catégorie de risque (1 à 3) déterminant l'ampleur minimale de l'investigation requise.

L'expérience récente en Afrique de l'Ouest illustre les conséquences d'un manquement à ce principe. Le recensement de 2021 du ministère sénégalais en charge de l'urbanisme dénombre 1 446 bâtiments menaçant ruine, dont 627 dans la seule région de Dakar [\[1\]](#). La Direction de la Construction et de l'Habitat rapporte au moins seize victimes d'effondrements sur la période 2024-2025, dont un immeuble R+3 à Touba ayant causé onze décès. Ces données ne signalent pas une défaillance isolée, mais une lacune structurelle dans la chaîne de décision géotechnique.

1.2 Quatre lacunes structurelles

- **Inadaptation des outils existants** les outils de modélisation géotechnique de référence (éléments finis, stabilité de pente) sont conçus et calibrés pour des contextes géologiques européens ou nord-américains, sans adaptation aux formations résiduelles tropicales latérites, argiles gonflantes, sables coquilliers côtiers ;
- **Absence de standardisation** aucun référentiel régional ne fixe la densité minimale de sondages par surface ou par type d'ouvrage, laissant cette décision à la seule appréciation du bureau d'études, d'où une hétérogénéité significative de la qualité des investigations menées ;

- **Dispersion de la donnée** les résultats de sondages demeurent fréquemment archivés sous forme de documents non géoréférencés (rapports PDF, tableurs), rendant impossible toute réutilisation spatiale ou capitalisation à l'échelle d'un site, d'une ville ou d'une région ;
- **Rupture entre mesure et décision** le passage de mesures ponctuelles (un sondage = un point) à une caractérisation continue et tridimensionnelle du sous-sol reste, dans la majorité des projets, artisanal ou simplement absent alors qu'il s'agit précisément de l'objet de la géostatistique, discipline mature depuis les travaux fondateurs de Matheron dans les années 1960.

Principe directeur de cet ouvrage

Une reconnaissance géotechnique n'a de valeur scientifique que si elle produit un modèle dont la fiabilité peut être quantifiée et non seulement estimée par jugement d'expert. C'est le fil conducteur de la Partie II (Chapitres 3 à 6).

1.3 Spécificités géologiques de l'Afrique de l'Ouest

Les formations rencontrées en Afrique de l'Ouest présentent des comportements mécaniques qui justifient une vigilance méthodologique particulière : les latérites, issues de processus d'altération tropicale intense, présentent une hétérogénéité verticale et latérale marquée (cuirasses indurées sur horizons meubles) ; les argiles tropicales peuvent développer un potentiel de gonflement significatif sous variation hydrique saisonnière ; les formations côtières sablo-carbonatées, fréquentes sur le littoral sénégalais, combinent une granulométrie variable et la présence possible de bioclastes affectant la résistance au cisaillement.

Les travaux conduits sur les sols latéritiques d'Afrique centrale et de l'Ouest convergent sur un constat : la genèse et les conditions climatiques de formation déterminent fortement le comportement géotechnique final, davantage que la seule appartenance à la grande famille des « latérites ». Une étude menée sur des sols latéritiques de la région de Mfou (Cameroun) a ainsi mis en évidence, par couplage d'analyses géochimiques, minéralogiques et géotechniques conventionnelles, une variabilité significative des propriétés d'un même faciès apparent en fonction du degré d'altération et de la proportion d'oxydes de fer et d'aluminium [3]. Cette hétérogénéité intrinsèque qui peut se manifester à l'échelle du mètre au sein d'un

même profil renforce, plus qu'elle ne contredit, la nécessité d'une caractérisation spatiale rigoureuse plutôt que d'une extrapolation par analogie régionale.

1.4 Le cadre normatif international et la question de son adaptation

L'Eurocode 7 ne prescrit pas un nombre fixe de sondages : il définit un cadre méthodologique catégories géotechniques, exigences de planification et de compte-rendu des investigations dont l'application quantitative (combien de sondages, à quelle profondeur, à quel espacement) reste, dans une large mesure, déléguée au jugement de l'ingénieur et, lorsqu'ils existent, à des référentiels nationaux ou professionnels complémentaires. La partie 2 de l'Eurocode 7 (EN 1997-2) détaille les exigences relatives à la planification des investigations géotechniques et à la dérivation des valeurs caractéristiques des paramètres de sol, mais elle a été calibrée et éprouvée sur des contextes géologiques et un retour d'expérience essentiellement européens.

Cette situation n'est pas un défaut du référentiel elle est inhérente à la nature même d'un Eurocode, conçu comme un cadre adaptable par des annexes nationales. Elle implique cependant que l'espace UEMOA, qui ne dispose pas encore d'annexe nationale consolidée pour l'ensemble de ses États membres, applique aujourd'hui un cadre méthodologique robuste mais dont le contenu quantitatif reste à calibrer sur les sols et les pratiques locales c'est précisément l'enjeu développé au Chapitre 23.

1.5 Le coût de l'inaction : un raisonnement économique simple

L'argument en faveur d'une investigation géotechnique plus rigoureuse est souvent perçu comme un coût additionnel pour le maître d'ouvrage. Ce raisonnement inverse la hiérarchie réelle des coûts : une campagne de sondages complémentaires représente typiquement une fraction mineure du coût global d'un projet de construction, tandis qu'une reprise de fondation, un tassement différentiel non anticipé ou, dans le pire des cas, un effondrement, engagent des coûts directs et indirects d'un ordre de grandeur largement supérieur sans même considérer le coût humain, qui ne se compare à aucune métrique économique. Le rôle d'une méthodologie rigoureuse de reconnaissance n'est donc pas de renchérir systématiquement l'investigation, mais de l'optimiser : concentrer l'effort de sondage là où l'incertitude géologique le justifie, et le réduire là où elle est faible un principe rendu opérationnel par la cartographie de variance présentée au Chapitre 4.

1.6 Structure de l'ouvrage et logique de lecture

Les parties qui suivent répondent chacune à une étape de la chaîne géotechnique numérique : la Partie II établit les fondements géostatistiques de la modélisation 3D du sous-sol ; la Partie III détaille l'essai pressiométrique Ménard et son interpolation spatiale ; la Partie IV couvre les cinq grandes familles d'essais de laboratoire ; la Partie V applique ces résultats au dimensionnement des fondations selon l'Eurocode 7 ; la Partie VI traite des livrables d'ingénierie ; la Partie VII situe le rôle de l'intelligence artificielle ancrée dans ce processus ; le Chapitre 23, enfin, esquisse la contribution de cette démarche à une normalisation régionale encore à construire.

1.7 Le rôle du jugement d'ingénieur dans une démarche quantifiée

Aucune des méthodes décrites dans cet ouvrage ne se substitue au jugement de l'ingénieur géotechnicien elles le documentent et l'objectivent. Un modèle géostatistique, quelle que soit sa sophistication, reste construit à partir d'hypothèses (choix d'un modèle de variogramme, regroupement des faciès en domaines lithologiques, fenêtre de validité spatiale du modèle) qui relèvent de la compétence et de l'expérience de l'ingénieur. L'apport de la démarche quantitative n'est donc pas de remplacer ce jugement, mais de le rendre vérifiable : deux ingénieurs partageant les mêmes données et appliquant la même méthodologie aboutiront à des résultats reproductibles, alors que deux interprétations manuelles indépendantes d'un même jeu de sondages peuvent diverger sans qu'aucune des deux ne soit objectivement réfutable. Cette reproductibilité est elle-même une exigence de la pratique de l'ingénierie telle qu'elle est attendue par les autorités de contrôle et les organismes d'assurance qualité.

1.8 Lecture comparée avec d'autres régions en développement

La situation décrite pour l'Afrique de l'Ouest absence de référentiel régional de densité de sondages, hétérogénéité des pratiques de bureau d'études, sols résiduels tropicaux mal couverts par les abaques d'origine tempérée n'est pas unique au contexte sénégalais ou ouest-africain : des constats similaires ont été documentés pour les sols latéritiques d'Afrique centrale, où la variabilité géotechnique des formations résiduelles, fortement dépendante du degré d'altération et de la roche mère, a justifié des campagnes de caractérisation dédiées plutôt qu'une simple transposition des classifications routières ou des abaques de dimensionnement

établis pour d'autres contextes géologiques [3]. Cette convergence de constats à l'échelle du continent renforce l'argument en faveur d'une démarche méthodologique reproductible et quantifiée, plutôt que d'un empirisme propre à chaque bureau d'études ou à chaque pays.

1.9 Acteurs concernés par cet ouvrage

Le contenu méthodologique des parties suivantes s'adresse à un ensemble d'acteurs aux besoins complémentaires : les bureaux d'études géotechniques, qui y trouveront un cadre méthodologique structuré pour leurs missions de reconnaissance et de dimensionnement ; les laboratoires nationaux de référence, dont la mission de capitalisation de la donnée géotechnique régionale rejoint directement la démarche du Chapitre 23 ; les entreprises de construction, premières concernées par la traduction opérationnelle des recommandations géotechniques sur le chantier ; les organismes publics chargés de la planification urbaine et de la délivrance des autorisations de construire, pour qui la cartographie de risque géotechnique (Chapitre 4) offre un outil de décision à l'échelle d'un territoire plutôt que d'un seul projet ; et, enfin, les établissements d'enseignement supérieur, pour lesquels cet ouvrage est conçu comme un support structuré couvrant l'ensemble de la chaîne géotechnique numérique en un seul volume de référence.

1.10 Limites du périmètre couvert

Cet ouvrage ne traite pas, dans sa présente édition, de la stabilité des pentes et des talus, des ouvrages de soutènement, ni de la caractérisation sismique des sols trois extensions naturelles de la méthodologie exposée, identifiées comme développements futurs au Chapitre 23. Le périmètre retenu ici investigation, modélisation géostatistique, essais pressiométriques et de laboratoire, dimensionnement de fondations superficielles et profondes constitue le socle commun à la grande majorité des projets de construction courants, sur lequel ces extensions futures pourront s'appuyer sans remise en cause de la méthode.

1.11 Pourquoi un ouvrage et non une succession d'articles

Le choix de réunir l'ensemble de ces méthodes dans un ouvrage structuré, plutôt que de les disperser en une succession d'articles techniques indépendants, répond à une conviction centrale de ses auteurs : la valeur de chaque méthode prise isolément le krigeage, l'essai pressiométrique, le calcul de tassement est réelle mais limitée si

elle n'est pas reliée aux autres maillons de la chaîne géotechnique numérique. C'est l'articulation entre ces méthodes, et non leur seule juxtaposition, qui constitue l'apport distinctif de cet ouvrage par rapport à la documentation technique dispersée : articles scientifiques, normes individuelles, manuels d'essai déjà disponible par ailleurs sur chacun de ces sujets pris séparément.

1.12 Note sur l'usage des références bibliographiques

Les renvois numérotés entre crochets utilisés tout au long de cet ouvrage renvoient à la liste bibliographique consolidée en Annexe C, qui regroupe à la fois des références fondatrices de la géostatistique et de la mécanique des sols, des normes d'application directe, et des travaux de recherche récents spécifiquement consacrés aux sols et contextes ouest-africains. Cette articulation entre littérature fondatrice, cadre normatif et recherche régionale récente reflète la démarche de l'ouvrage lui-même : fonder chaque méthode sur des bases scientifiques établies, tout en l'ancrant dans les spécificités du contexte qu'il entend servir.

1.13 Synthèse de la partie

Ces deux premiers chapitres ont posé les fondements qui justifient l'ensemble de la démarche méthodologique développée dans cet ouvrage : un diagnostic documenté des lacunes actuelles de la pratique géotechnique régionale (Chapitre 1), et les principes de gestion de la donnée qui conditionnent la mise en œuvre rigoureuse de toute méthode quantitative ultérieure (Chapitre 2). Le lecteur abordant les Parties II et suivantes gardera à l'esprit que chaque méthode statistique ou normative qui y sera exposée ne produit de résultat fiable que si la donnée d'entrée respecte les exigences de géoréférencement, de standardisation et de traçabilité rappelées ici un principe simple, mais dont le non-respect demeure la cause la plus fréquente d'échec silencieux d'une démarche par ailleurs méthodologiquement irréprochable.

CHAPITRE 02

Principes de gestion intégrée de la donnée géotechnique

2.1 Géolocalisation et référencement spatial

La première condition d'une exploitation géostatistique rigoureuse des données de sondage est leur géoréférencement précis dans un système de coordonnées cohérent. Un sondage non géolocalisé ou géolocalisé dans un référentiel ambigu ne peut être mis en relation spatiale avec ses voisins, ce qui interdit tout calcul de variogramme (Chapitre 3) et, par construction, toute interpolation rigoureuse. La reprojection systématique vers un système de projection UTM adapté à la zone d'étude constitue un prérequis méthodologique, non une simple commodité technique.

2.2 Standardisation des données de sondage

Un sondage géotechnique, qu'il soit carotté ou pressiométrique, produit typiquement deux familles de données : une description lithologique stratifiée (succession de couches, profondeurs de toit et de base, faciès) et des mesures mécaniques associées (paramètres pressiométriques, résultats d'essais de laboratoire). La standardisation de ces données unités, conventions de profondeur, nomenclature des faciès est la condition de leur comparabilité entre sondages, entre sites, et dans le temps.

En pratique, l'espace UEMOA est couvert par plusieurs zones du système de projection UTM (Universal Transverse Mercator) la zone 28N pour le Sénégal occidental, par exemple et la cohabitation de relevés anciens en projection locale avec des relevés récents en coordonnées géographiques WGS84 est fréquente. La détection explicite du référentiel source et sa reprojection systématique vers un système unique avant tout traitement géostatistique évitent une catégorie d'erreurs particulièrement insidieuse : des sondages visuellement proches sur une carte mais en réalité décalés de plusieurs centaines de mètres du fait d'une confusion de référentiel, ce qui fausserait silencieusement tout calcul de variogramme sans qu'aucune alerte ne soit levée par les outils de calcul eux-mêmes.

Cette standardisation porte sur trois plans distincts, souvent confondus dans la pratique courante : l'unité de mesure (un mélange de profondeurs en mètres et en pieds, ou de pressions en kPa et en bars, au sein d'un même jeu de données, est une source d'erreur fréquente lors de la reprise de fonds anciens) ; la convention de référence verticale (profondeur sous terrain naturel, sous une cote de référence fixe, ou altitude absolue trois conventions légitimes mais incompatibles sans

conversion explicite) ; et la nomenclature des faciès lithologiques, qui doit reposer sur un vocabulaire fermé et partagé plutôt que sur la description libre d'un opérateur à l'autre, sous peine de transformer une même formation géologique en plusieurs entités distinctes aux yeux d'un traitement automatisé.

2.3 Traçabilité et qualité de la donnée

Une investigation géotechnique constitue un actif qui dépasse le seul projet pour lequel elle a été menée : correctement archivée et géoréférencée, elle alimente la connaissance régionale du sous-sol pour les projets futurs. Cette capitalisation, développée au Chapitre 23, ne peut se construire que sur des données dont la provenance, la date et la méthode d'acquisition sont systématiquement tracées.

La traçabilité recouvre, au minimum, l'identité du maître d'œuvre de la campagne, la date d'exécution, la méthode de forage et d'essai employée (carottage continu, destructif, pressiométrique Ménard ou autopénétrant), et la référence de l'appareillage utilisé lorsque pertinent (étalonnage de la sonde pressiométrique notamment, cf. Chapitre 7). Cette exigence, qui peut sembler administrative, conditionne en réalité la possibilité même de réutiliser une donnée ancienne dans un nouveau modèle géostatistique : deux essais pressiométriques exécutés à dix ans d'écart avec des protocoles d'étalonnage différents ne sont comparables qu'à la condition que cette différence soit documentée et puisse être prise en compte dans l'interprétation.

2.4 De la donnée individuelle au patrimoine de connaissance collectif

Un sondage correctement standardisé et tracé n'est pas seulement exploitable pour le projet qui l'a commandité : il constitue, au sein de l'organisation qui l'a produit, un actif capitalisable pour ses propres projets futurs sur le même site ou à proximité et, si l'organisation y consent librement, une donnée cessible à des laboratoires de recherche selon des conditions négociées (§ 2.7). Cette dimension collective de la donnée géotechnique, encore peu structurée dans la pratique régionale actuelle, est au fondement de la démarche de capitalisation présentée au Chapitre 23 : c'est l'accumulation progressive de données standardisées, et non un seul projet de recherche isolé, qui permettra de construire les référentiels régionaux aujourd'hui absents.

Principe de gestion de la donnée

Une donnée de sondage non géoréférencée, non standardisée ou non tracée n'est pas seulement un sondage de moindre valeur scientifique : c'est un sondage dont le coût d'acquisition a été engagé sans que le bénéfice de réutilisabilité pourtant peu coûteux à obtenir au moment de la saisie ait été capté.

2.5 Champs minimaux d'un enregistrement de sondage

Indépendamment de tout choix d'outil ou de support, un enregistrement de sondage géotechnique destiné à une exploitation géostatistique ultérieure devrait, au minimum, documenter : l'identifiant unique du sondage et du site auquel il se rattache ; ses coordonnées géographiques et le système de référence employé ; la cote du terrain naturel au point de sondage ; la profondeur totale atteinte et la méthode d'exécution ; pour chaque couche rencontrée, sa profondeur de toit et de base ainsi que sa description lithologique selon une nomenclature fermée ; et, lorsque disponibles, les résultats des essais in situ et de laboratoire associés, avec leur profondeur d'échantillonnage propre. L'absence de l'un de ces champs ne rend pas le sondage inutilisable, mais restreint d'autant l'étendue des traitements géostatistiques qui pourront légitimement s'appuyer sur lui.

2.6 De la collecte à la décision : une chaîne sans rupture

La valeur d'une donnée correctement standardisée se mesure à sa capacité à traverser, sans ressaisie ni réinterprétation manuelle, l'ensemble de la chaîne décrite dans cet ouvrage : de la géolocalisation initiale (présent chapitre) à l'ajustement du variogramme (Chapitre 3), à l'estimation géostatistique (Chapitres 4 et 5), à sa validation (Chapitre 6), jusqu'à son exploitation dans le dimensionnement des fondations (Partie V) et sa restitution dans le rapport géotechnique final (Chapitre 21). Toute rupture dans cette chaîne une ressaisie manuelle, une conversion d'unité non documentée, une perte de la référence de profondeur constitue un point d'introduction d'erreur qui n'est généralement détecté que tardivement, au moment où ses conséquences sur le dimensionnement deviennent visibles.

2.7 Propriété et confidentialité de la donnée

Le principe fondateur de la gestion de la donnée dans l'écosystème GeoSol Studio est la souveraineté intégrale de chaque entité sur ses propres données. Chaque bureau d'études, administration, laboratoire ou maître d'ouvrage demeure propriétaire exclusif des données qu'il produit et héberge : ni l'éditeur du logiciel, ni aucun tiers ne dispose d'un droit d'accès à ces données sans le consentement explicite de l'entité qui les détient. Cette souveraineté n'est pas une simple clause contractuelle : elle est inscrite dans l'architecture même du système. Chaque organisation capitalise ainsi ses propres données à son propre bénéfice elles constituent un patrimoine technique exploitable pour ses projets futurs, ses analyses comparatives internes et la montée en compétence de ses équipes. La dimension collective décrite au Chapitre 23 repose, quant à elle, sur un mécanisme volontaire et rémunéré : les laboratoires de recherche souhaitant constituer des bases de données régionales à grande échelle peuvent acquérir des jeux de données auprès des entités consentantes, selon des conditions librement négociées entre les parties. Ce modèle garantit que la capitalisation régionale se construit sans compromettre la souveraineté de chaque acteur, et que la valeur économique de la donnée revient à ceux qui l'ont produite.

2.8 Sécurité et intégrité de la donnée numérique

Une fois numérisée et structurée selon les principes de ce chapitre, la donnée géotechnique devient sujette aux mêmes exigences de sécurité que tout actif numérique professionnel : sauvegarde régulière prévenant la perte accidentelle, contrôle d'accès limitant la modification non autorisée des données validées, et conservation d'un historique des versions successives d'un même jeu de données lorsque celui-ci évolue (paragraphe 6.7). Ces exigences, normales dans toute pratique professionnelle numérique rigoureuse, prennent un relief particulier pour une donnée dont l'altération silencieuse pourrait compromettre la sécurité d'un ouvrage sans qu'aucun signal n'alerte l'ingénieur exploitant le modèle.

2.9 Interopérabilité des formats de stockage

Le choix d'un format de stockage pour la donnée géotechnique standardisée devrait privilégier des formats ouverts et largement supportés fichiers tabulaires structurés, bases de données relationnelles standard plutôt que des formats propriétaires liés à un outil logiciel particulier, dont la pérennité d'accès à long terme n'est pas garantie

au-delà du cycle de vie commercial de l'outil considéré. Cette précaution, qui peut sembler secondaire au moment de la collecte initiale, conditionne directement la capacité de réutilisation de la donnée dans les décennies suivantes horizon de temps pertinent pour un actif géotechnique appelé à informer des projets successifs sur un même site (paragraphe 2.4).

2.10 Synthèse de la partie

Cette partie introductive a posé les deux fondations sur lesquelles reposent l'ensemble des méthodes développées dans la suite de l'ouvrage : une compréhension claire des lacunes structurelles qui justifient une démarche méthodologique rigoureuse (Chapitre 1), et les principes concrets de gestion de la donnée géotechnique qui en conditionnent la mise en œuvre (présent chapitre). La Partie II qui suit peut désormais introduire, sur cette base, les fondements mathématiques de la géostatistique appliquée à la modélisation du sous-sol.

PARTIE II : Modélisation géostatistique du sous-sol

Fondements de la géostatistique appliquée à la géotechnique

3.1 De l'interpolation naïve à l'estimation probabiliste

Entre deux sondages distants de plusieurs dizaines de mètres, la tentation naturelle est de relier les observations par une interpolation linéaire. Cette approche, qui ignore la structure spatiale réelle de la variabilité géologique, ne fournit aucune mesure de l'incertitude associée à l'estimation. La géostatistique, fondée par Georges Matheron à partir des travaux de Krige sur les gisements miniers sud-africains, répond à cette limite en modélisant explicitement la corrélation spatiale entre observations [4].

3.2 Le variogramme : mesure de la corrélation spatiale

Le variogramme expérimental quantifie la dissemblance moyenne entre deux mesures séparées d'une distance h . Pour une variable régionalisée Z observée en $N(h)$ paires de points séparés par h :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3.1)$$

Le variogramme expérimental est ensuite ajusté par un modèle théorique continu, généralement choisi parmi les familles sphérique, exponentielle ou gaussienne, caractérisées par trois paramètres :

- **la portée (a)** la distance au-delà de laquelle deux observations ne sont plus corrélées ;
- **le palier (c)** le niveau de variance maximal atteint à grande distance ;
- **l'effet de pépité (c₀)** la discontinuité à l'origine, traduisant la variabilité à très courte distance ou l'incertitude de mesure.

Le modèle sphérique, fréquemment retenu pour les variables géotechniques en raison de son comportement linéaire à l'origine et de sa portée finie clairement définie, s'écrit :

$$\gamma(h) = c_0 + c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (h \leq a) \quad ; \quad \gamma(h) = c_0 + c \quad (h > a) \quad (3.2)$$

3.3 Le krigeage : estimateur linéaire à variance minimale

Le krigeage estime la valeur $Z^*(x_0)$ en un point non observé comme combinaison linéaire pondérée des observations voisines :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3.3)$$

Les pondérations λ_i sont déterminées par résolution du système de krigeage, qui minimise la variance d'estimation sous la contrainte de non-biais (système résolu par multiplicateur de Lagrange μ) :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0), \quad i = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

Contrairement à une interpolation déterministe, le krigeage produit simultanément une estimation et sa variance associée fondement de la cartographie probabiliste présentée au chapitre suivant. Cette propriété distingue fondamentalement le krigeage de toute méthode d'interpolation purement géométrique [5].

Pondération par l'épaisseur des strates

En contexte géotechnique, l'ajustement du variogramme doit accorder un poids proportionnel à l'épaisseur de chaque strate rencontrée : une strate de quelques mètres pèse davantage dans la caractérisation volumique du site qu'une fine intercalation centimétrique, et doit être traitée comme telle lors de l'ajustement.

3.4 Anisotropie : la continuité n'est pas la même dans toutes les directions

Les formations géologiques se déposent et s'altèrent selon des processus directionnels sédimentation, altération depuis la surface, érosion latérale qui produisent une continuité spatiale généralement bien plus marquée horizontalement que verticalement : une couche argileuse peut rester identifiable sur plusieurs centaines de mètres latéralement, alors que sa transition verticale vers

la formation sous-jacente se produit sur quelques décimètres. Ignorer cette anisotropie en ajustant un variogramme unique, isotrope, sur l'ensemble des directions revient à sous-estimer la continuité horizontale réelle et à surestimer la continuité verticale, avec pour conséquence un modèle 3D lissé de façon incorrecte dans les deux sens. L'ajustement de variogrammes directionnels distincts (horizontal et vertical, voire selon plusieurs azimuts lorsque le contexte structural le justifie) est donc une étape de bonnes pratiques plutôt qu'un raffinement optionnel.

3.5 Exemple illustratif d'ajustement

À titre d'illustration pédagogique, considérons une formation argileuse pour laquelle l'ajustement d'un variogramme expérimental sur la profondeur d'un contact géologique conduirait à un modèle sphérique de portée $a \approx 85$ m, de palier $c \approx 2,3$ m² et d'effet de pépité $c_0 \approx 0,15$ m². Une portée de cet ordre signifie concrètement que deux sondages distants de moins de 85 m apportent une information mutuelle significative sur la profondeur du contact, justifiant un maillage de sondages plus serré que cette distance pour contraindre efficacement le modèle ; au-delà, chaque sondage additionnel renseigne une zone géologiquement quasi indépendante des précédentes. Un effet de pépité faible par rapport au palier (ici environ 6,5 % du palier) traduit une mesure de profondeur fiable et une variabilité à très courte distance limitée à l'inverse, un effet de pépité élevé alerterait sur une qualité de mesure douteuse ou une hétérogénéité non capturée par l'échantillonnage disponible.

Une étude portant spécifiquement sur l'optimisation des approches géostatistiques appliquées à des jeux de données de sondages géotechniques a confirmé, sur cas réel, que le choix du modèle de variogramme et de ses paramètres affecte significativement la qualité du modèle 3D résultant, et a proposé une procédure d'optimisation systématique de ces paramètres plutôt qu'un ajustement visuel non contrôlé [\[6\]](#).

CHAPITRE 04

Krigeage d'indicateur pour la modélisation 3D multi-lithologique

4.1 Principe de la variable indicatrice

Lorsque la géologie d'un site présente des corps discontinus lentilles, poches, intercalations irrégulières —, le krigeage d'une variable continue perd sa pertinence. Le krigeage d'indicateur transpose le problème : pour chaque lithologie k , on définit une variable binaire

$$I(x; k) \in \{0, 1\}, \quad I(x; k) = 1 \Leftrightarrow \text{lithologie } k \text{ présente en } x$$

(4.1)

Cette variable est krigée sur une grille tridimensionnelle régulière (modèle voxel), produisant en chaque point une estimation continue comprise entre 0 et 1, interprétable directement comme une probabilité de présence de la lithologie considérée.

4.2 De la carte déterministe à la carte de risque

La résolution simultanée du système de krigeage pour l'ensemble des lithologies d'un site, suivie d'une renormalisation simplexe assurant que les probabilités estimées en chaque voxel somment à l'unité, produit deux grandeurs essentielles : la lithologie la plus probable en chaque point, et la variance d'estimation associée. Cette dernière constitue, au sens propre, une carte de risque géotechnique quantifiée : elle identifie les zones du site où l'incertitude sur la nature du sous-sol demeure élevée typiquement entre sondages distants ou en présence d'une forte variabilité locale —, guidant ainsi la décision d'investigation complémentaire sur une base objective plutôt que sur la seule intuition.

4.3 Domaine d'application

Cette approche est recommandée pour les géologies discontinues caractéristiques de nombreux contextes ouest-africains : intercalations latéritiques irrégulières, poches argileuses, ou successions sédimentaires complexes. Elle requiert un nombre suffisant de sondages pour contraindre le variogramme de chaque lithologie indépendamment une exigence à mettre en regard du chapitre suivant pour les géologies plus simples, où une approche alternative s'avère plus robuste.

4.4 Le problème du lissage et ses corrections

Le krigeage, en tant qu'estimateur linéaire à variance minimale, présente une propriété structurelle bien documentée dans la littérature géostatistique : il lisse systématiquement les variations réelles du phénomène, l'amplitude du lissage augmentant avec la distance aux observations les plus proches. Pour une variable indicatrice, ce lissage se traduit par un arrondissement des limites entre domaines lithologiques, qui apparaissent plus progressives sur le modèle qu'elles ne le sont en réalité sur le terrain, où un contact géologique peut être franc. Des travaux méthodologiques ont proposé de combiner krigeage ordinaire et krigeage d'indicatrice afin de réduire spécifiquement ce lissage au voisinage des transitions entre domaines, améliorant la fidélité du modèle aux limites géologiques observées sans sacrifier la stabilité numérique de l'estimation. Le principe reste transposable à la modélisation géotechnique : la prudence interprétative recommandée au Chapitre 18 vis-à-vis des coupes interpolées découle directement de cette propriété de lissage, inhérente à la méthode et non à une mauvaise mise en œuvre.

4.5 Nombre de lithologies et complexité computationnelle

Le krigeage d'indicatrice multi-lithologique requiert de résoudre un système de krigeage distinct pour chaque lithologie présente sur le site, le nombre de systèmes croissant donc linéairement avec le nombre de faciès distingués. Une classification lithologique trop fine distinguant par exemple plusieurs nuances d'un même faciès argileux sans justification mécanique dilue l'information disponible par sondage entre un nombre croissant de variables indicatrices, au détriment de la robustesse de chaque variogramme ajusté. Le regroupement des faciès en un nombre limité de classes géotechniquement pertinentes c'est-à-dire distinguées par un comportement mécanique réellement différent plutôt que par une nuance purement descriptive constitue une étape de jugement d'ingénieur en amont du calcul géostatistique lui-même.

4.6 Restitution visuelle du modèle d'indicatrice

Le modèle voxel résultant se prête à deux modes de représentation complémentaires : une représentation déterministe, où chaque voxel affiche la lithologie de probabilité maximale, offrant une image synthétique immédiatement lisible mais qui masque l'incertitude sous-jacente ; et une représentation probabiliste, où la transparence ou la teinte de chaque voxel est modulée par la

probabilité associée, donnant une image plus nuancée mais exigeant une familiarisation du lecteur avec ce mode de représentation. La production conjointe de ces deux représentations, plutôt que de la seule carte déterministe habituellement présentée, constitue une bonne pratique de transparence directement héritée du principe énoncé au paragraphe 4.2.

4.7 Choix de la résolution de la grille voxel

La taille de maille retenue pour la grille voxel résulte d'un compromis entre finesse de représentation et charge de calcul : une maille trop fine au regard de la densité de sondages disponible donne une fausse impression de précision, le modèle se contentant d'interpoler à très haute résolution une information dont la densité réelle ne justifie pas un tel niveau de détail ; une maille trop grossière, à l'inverse, lisse des variations géologiques significatives à l'échelle de l'ouvrage projeté. Une règle pragmatique consiste à caler la taille de maille verticale sur l'épaisseur minimale des couches géotechniquement significatives identifiées sur le site (Chapitre 2), et la taille de maille horizontale sur une fraction de la portée du variogramme ajusté (paragraphe 3.2).

CHAPITRE 05

Krigeage des surfaces de contact pour géologies stratifiées

5.1 Principe et critère de choix méthodologique

Pour les géologies à stratification régulière empilement continu de formations sans lentilles ni discontinuités majeures —, il est plus robuste et plus économe en données de kriger directement la profondeur de chaque surface de contact entre formations successives, plutôt que de modéliser chaque lithologie indépendamment par indicatrice. Le choix entre les deux approches krigeage d'indicatrice (Chapitre 4) ou krigeage de surfaces de contact doit être guidé par la complexité géologique observée sur le terrain, et non par une préférence méthodologique a priori.

5.2 Validation sur des contextes géologiques contrastés

L'application de cette méthode à trois sites sénégalais aux géologies contrastées formations latéritiques de la région de Diourbel, argiles et formations sédimentaires de la région de Fatick, géologie côtière carbonatée de la région de Diamniadio démontre la robustesse de l'approche dès lors que la stratification reste raisonnablement continue à l'échelle du site.

5.3 Livrables dérivés du modèle de contact

Le modèle de surfaces de contact, une fois validé, alimente directement la génération de coupes géologiques 2D (Chapitre 18), le calcul de volumes par formation utile aux opérations de terrassement (Chapitre 19), et l'extraction des épaisseurs de couches en tout point du site donnée d'entrée du dimensionnement des fondations (Partie V).

5.4 Gestion des inversions et des biseaux

Le krigeage indépendant de chaque surface de contact peut, sur les bords d'un site faiblement échantillonné, produire localement des profondeurs estimées incohérentes entre deux surfaces successives une surface inférieure estimée au-dessus de la surface qui devrait la dominer. Cette situation, qui traduit une insuffisance locale de contrainte par la donnée plutôt qu'une erreur de calcul, doit être détectée systématiquement (par simple comparaison des profondeurs estimées) et traitée explicitement par contrainte d'ordre dans le système de krigeage, ou par troncature documentée plutôt que laissée sans contrôle dans le modèle final. Les zones de biseau, où une formation s'amenuise progressivement jusqu'à disparaître latéralement, appellent une vigilance comparable : la représentation graphique de ce pincement (Chapitre 18) doit rester fidèle à l'incertitude réelle plutôt que de prolonger artificiellement une épaisseur nulle au-delà du dernier point où la formation a été effectivement observée.

5.5 Articulation avec le krigeage d'indicatrice

Les deux approches présentées dans ce chapitre et le précédent ne s'opposent pas terme à terme : un même site peut combiner, à des échelles ou des zones différentes, une stratification dominante traitée par surfaces de contact et des anomalies locales (lentilles, poches) mieux décrites par krigeage d'indicatrice. La décision méthodologique pertinente n'est donc pas binaire à l'échelle du projet, mais

peut être locale, guidée par l'examen préalable des logs lithologiques et par la cohérence des résultats de validation croisée (Chapitre 6) obtenus avec chaque approche sur chaque zone.

CHAPITRE 06

Validation des modèles : la méthode Leave-One-Out

6.1 Pourquoi valider un modèle géostatistique

Un modèle géostatistique produit toujours une carte visuellement plausible ce qui ne constitue en aucun cas une preuve de fiabilité. La validation croisée Leave-One-Out (LOO) répond à cette exigence en retirant successivement chaque sondage du jeu de données, en réestimant le modèle (variogramme et krigeage) sans ce sondage, puis en comparant la prédiction obtenue à la valeur réellement mesurée [5].

6.2 Indicateurs de fiabilité

Répétée sur l'ensemble des sondages, cette procédure produit des métriques objectives. Pour n sondages testés, l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne s'écrivent :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i)^2} \quad ; \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{z}_i - z_i| \quad (6.1)$$

Le biais moyen complète ces deux indicateurs en révélant une éventuelle tendance systématique à la sur- ou sous-estimation :

$$Biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i) \quad (6.2)$$

Un taux de prédiction à seuil fixé (par exemple, la proportion de prédictions à moins d'un mètre de la profondeur réelle d'un contact géologique) complète utilement ces métriques pour une communication directe avec un maître d'ouvrage non spécialiste.

6.3 Un point de vigilance méthodologique : les contacts ambigus

Point de vigilance

Aux points de contact exact entre deux couches géologiques, deux échantillons voisins peuvent partager une position quasi identique tout en appartenant à des lithologies différentes. Le modèle ne peut, par construction, prédire correctement les deux simultanément. Une validation rigoureuse doit identifier et traiter ces cas séparément, sous peine de plafonner artificiellement l'exactitude globale mesurée un biais de méthode, non de modèle.

6.4 De l'indicateur statistique à la décision d'ingénierie

La validation LOO ne constitue pas un exercice statistique isolé : elle transforme un jugement d'expert en indicateur vérifiable et opposable. En quantifiant la densité de sondages nécessaire pour atteindre un niveau de précision donné sur un contexte géologique donné, elle fournit la base scientifique d'une recommandation d'investigation complémentaire argumentée et justifiable devant un maître d'ouvrage ou une autorité de contrôle. Cette capacité est développée à l'échelle régionale au Chapitre 23.

6.5 Exemple illustratif de lecture des résultats

À titre d'illustration, supposons qu'une validation LOO conduite sur la profondeur d'un contact géologique, à partir de vingt sondages, produise un RMSE de 0,62 m, un MAE de 0,48 m, un biais de -0,05 m (donc négligeable) et un taux de prédiction à ± 1 m de 85 %. L'interprétation conjointe de ces quatre indicateurs est riche d'enseignements : l'écart entre RMSE et MAE (le premier étant plus sensible aux erreurs importantes) suggère l'absence d'erreurs ponctuelles très importantes ; le biais quasi nul écarte une tendance systématique de sur- ou sous-estimation du modèle ; le taux de prédiction à seuil fixé traduit directement, pour un maître d'ouvrage non spécialiste, la fiabilité opérationnelle attendue du modèle. Un même exercice conduit avec dix sondages seulement sur le même site verrait typiquement ces indicateurs se dégrader, quantifiant ainsi, de façon vérifiable, le gain de fiabilité

apporté par les dix sondages additionnels l'argument économique exact qui manque aujourd'hui aux bureaux d'études de la sous-région pour justifier une campagne d'investigation auprès d'un maître d'ouvrage.

6.6 Optimisation de la densité d'investigation : apports de la littérature

L'usage de la validation croisée pour qualifier et optimiser un modèle géotechnique tridimensionnel construit à partir de données de sondage a été documenté sur cas réel d'instrumentation de site, où elle a permis de comparer objectivement plusieurs approches géostatistiques et de sélectionner celle offrant la meilleure performance prédictive avant son utilisation pour la conception [6]. Cette démarche comparer plusieurs modèles candidats par leurs seules performances en validation croisée plutôt que par une préférence a priori pour une méthode constitue une bonne pratique transposable à l'ensemble des contextes géologiques traités par cet ouvrage, et notamment aux choix entre krigeage d'indicatrice et krigeage de surfaces de contact abordés au Chapitre 5.

6.7 Fréquence de réévaluation du modèle

Un modèle géostatistique validé à un instant donné n'est pas nécessairement valide indéfiniment : l'ajout de nouveaux sondages qu'il s'agisse d'une phase complémentaire d'investigation ou de la capitalisation de sondages antérieurs nouvellement intégrés (Chapitre 2) modifie la donnée d'entrée et justifie une réévaluation du variogramme et une nouvelle validation croisée, plutôt que la simple adjonction des nouveaux points au modèle existant sans réajustement. Cette discipline de réévaluation périodique, naturelle dans un contexte de projet évolutif (Chapitre 21), garantit que le modèle exploité pour la décision reflète l'état le plus à jour de la connaissance du site.

6.8 Validation croisée et responsabilité documentée

Au-delà de son rôle scientifique, la validation croisée joue un rôle de documentation de la diligence professionnelle : la conservation, dans le dossier du projet, des résultats de validation obtenus à chaque étape significative de l'étude constitue une preuve tangible que le modèle exploité pour le dimensionnement (Partie V) a fait l'objet d'une vérification objective, et non d'une simple présentation visuelle non qualifiée. Cette documentation, naturelle prolongation de l'exigence de traçabilité posée au Chapitre 2, constitue un élément de protection professionnelle pour

l'ingénieur signataire au même titre que toute autre pièce justificative d'un rapport technique.

6.9 Synthèse de la partie : du point de mesure au modèle validé

Cette partie a parcouru l'ensemble du cheminement géostatistique : fondements théoriques du variogramme et du krigeage (Chapitre 3), application aux géologies discontinues par krigeage d'indicateur (Chapitre 4), application aux géologies stratifiées par surfaces de contact (Chapitre 5), et validation objective de l'ensemble par la méthode Leave-One-Out (présent chapitre). Cette séquence théorie, méthode adaptée au contexte, validation systématique constitue le schéma méthodologique de référence que les parties suivantes appliquent, mutatis mutandis, aux paramètres mécaniques pressiométriques (Partie III) et, dans une moindre mesure, aux grandeurs de laboratoire (Partie IV).

Le lecteur souhaitant appliquer cette méthodologie à un projet réel retiendra, de cette partie, trois exigences non négociables : un géoréférencement et une standardisation rigoureuse de la donnée d'entrée (Chapitre 2), un choix méthodologique explicite et justifié entre indicatrice et surfaces de contact (Chapitre 5), et une validation systématique et documentée du résultat (présent chapitre) avant toute exploitation pour le dimensionnement.

PARTIE III : L'essai pressiométrique

Ménard

Théorie et pratique de l'essai pressiométrique

7.1 Principe de l'essai

L'essai pressiométrique, mis au point par Louis Ménard en 1955, consiste à appliquer une pression radiale croissante à la paroi d'un forage au moyen d'une sonde cylindrique dilatable, et à mesurer la déformation volumique résultante du sol en place. Contrairement aux essais de laboratoire, qui sollicitent un échantillon nécessairement remanié, l'essai pressiométrique caractérise le sol dans son état naturel, structure et état de contrainte in situ compris un avantage déterminant pour les sols structurés ou hétérogènes [\[7\]](#).

7.2 Paramètres mesurés

La courbe pressiométrique (pression appliquée en fonction du volume injecté) permet d'identifier trois phases successives recompression du sol remanié par le forage, phase pseudo-élastique, et phase de fluage plastique jusqu'à la pression limite desquelles sont extraits deux paramètres fondamentaux :

- **la pression limite nette PI^*** résistance limite du sol mobilisée à grande déformation, déterminée par extrapolation de la phase de fluage ;
- **le module pressiométrique EM** raideur du sol dans le domaine pseudo-élastique, caractérisant sa déformabilité sous faible sollicitation.

Ces deux paramètres sont normalisés par la norme NF P 94-110-1 [\[8\]](#) et son équivalent européen NF EN ISO 22476-4 [\[9\]](#), qui encadrent strictement le protocole d'essai, l'étalonnage de la sonde et les corrections de pression et de volume à appliquer.

7.3 Le rapport EM/PI^* : un indicateur de structure

Le rapport EM/PI^* , indépendant des deux paramètres pris isolément, constitue un indicateur précieux de la structure et de l'histoire géologique du sol : des valeurs faibles signalent généralement un sol remanié ou peu structuré, tandis que des valeurs élevées (sols indurés, roches altérées) traduisent une structure préservée.

Cet indicateur complète utilement Pl^* et EM dans la caractérisation d'un faciès et dans la détection d'anomalies de mesure.

7.4 Protocole d'exécution et points de vigilance

L'essai est généralement conduit par paliers de pression de durée fixe (60 secondes dans le protocole « essai sans cycle » le plus couramment employé), avec relevé du volume injecté à des intervalles de temps normalisés à chaque palier relevés qui permettent, en complément de Pl^* et EM, d'estimer le coefficient de fluage du sol. La qualité du forage préalable à la mise en place de la sonde conditionne directement la validité de l'essai : un forage qui remanie excessivement les parois (par exemple par lavage agressif dans un sol sableux lâche, ou par refoulement dans une argile molle) introduit une phase de recompression anormalement longue qui peut fausser l'interprétation de la phase pseudo-élastique et, par suite, le module EM.

7.5 Position de l'essai pressiométrique parmi les essais in situ

L'essai pressiométrique Ménard se distingue des autres essais in situ usuels pénétromètre dynamique, pénétromètre statique (CPT), scissomètre par sa capacité unique à fournir une mesure directe de déformabilité (le module EM) en complément d'un paramètre de résistance (Pl^*), au prix d'une mise en œuvre plus lourde (forage préalable systématique, durée d'essai par palier supérieure). Cette spécificité explique sa place centrale dans la méthode française de dimensionnement des fondations développée aux Chapitres 15 et 16 qui a précisément été conçue autour de ce couple de paramètres plutôt qu'autour des résistances de pointe fournies par d'autres essais.

7.6 Profondeur, espacement et programme d'essai

Le nombre et la profondeur des essais pressiométriques au sein d'un même sondage doivent être adaptés à la nature de l'ouvrage projeté : un espacement vertical resserré (de l'ordre du mètre) au voisinage de la profondeur d'ancrage probable des fondations est généralement plus informatif qu'un espacement régulier uniforme sur toute la hauteur du forage. Cette adaptation, qui requiert une hypothèse préalable même approximative sur le type de fondation envisagé, illustre la nature itérative de la reconnaissance géotechnique : une première campagne exploratoire oriente

le programme détaillé qui la complète, plutôt que de prétendre fixer d'emblée un programme définitif.

7.7 Corrections et sources d'erreur usuelles

Les valeurs brutes de pression et de volume relevées en forage doivent être corrigées de plusieurs effets avant interprétation : la perte de charge hydraulique dans la tubulure reliant le contrôleur pression-volume à la sonde, la résistance propre de la gaine de la sonde, et la pression hydrostatique liée à la différence de cote entre l'appareil de mesure en surface et la sonde en profondeur. Ces corrections, normalisées et généralement appliquées de façon automatique par les équipements modernes, doivent néanmoins être vérifiées lors de l'interprétation d'essais anciens ou de matériel non étalonné récemment : une sonde mal étalonnée produit une erreur systématique sur EM qui peut rester indétectable sans comparaison à un essai de référence.

7.8 Optimisation et instrumentation moderne

Les développements méthodologiques récents autour de l'essai pressiométrique explorent des approches de prédiction du module pressiométrique fondées sur l'optimisation de surface de réponse à partir de paramètres d'essai et de site complémentaires, dans une perspective de conception géotechnique assistée par des méthodes quantitatives plus riches que la seule lecture directe de la courbe pressiométrique. Ces approches, encore émergentes, illustrent que l'essai pressiométrique outil mis au point dans les années 1950 continue de faire l'objet de raffinements méthodologiques actifs plutôt que de constituer une technique figée, et restent cohérentes avec le principe d'ancrage sur la donnée réelle développé au Chapitre 22 : l'optimisation complète, mais ne remplace pas, la mesure de terrain elle-même.

7.9 Comparabilité inter-sites et effet opérateur

La comparaison de résultats pressiométriques obtenus par des opérateurs ou des entreprises de forage différents sur un même site, ou sur des sites voisins destinés à une capitalisation commune (Chapitre 23), suppose une vigilance particulière sur l'homogénéité du protocole de forage préalable : un même sol latéritique pourra présenter des valeurs de Pl^* sensiblement différentes selon la technique de forage employée (tarière, destructif à l'eau, carottage), du seul fait du remaniement

différentiel induit. Cette source de variabilité, distincte de la variabilité géologique réelle (Chapitre 3), doit être documentée (Chapitre 2) pour ne pas être confondue avec elle lors de l'interprétation géostatistique.

7.10 Choix du nombre d'essais par sondage

Le nombre d'essais pressiométriques pratiqués au sein d'un même forage résulte d'un compromis entre exhaustivité de la caractérisation verticale et coût de la campagne : chaque essai impose un palier d'immobilisation du matériel de forage pendant la durée de l'essai lui-même (paragraphe 7.4), ce qui limite en pratique le nombre d'essais réalisables par journée de forage. Une règle empirique répandue consiste à multiplier les essais aux profondeurs charnières (changement de faciès, profondeur d'ancrage probable) et à les espacer davantage dans les zones reconnues homogènes une application directe, au sein même d'un seul sondage, du principe d'optimisation de l'investigation développé à l'échelle du site au Chapitre 1.

7.11 Interprétation en présence de discontinuités structurales

La présence de fissures, de cavités ou de blocs résiduels non altérés au sein d'une matrice plus meuble configuration fréquente dans les profils latéritiques évolués peut produire des courbes pressiométriques atypiques, dont l'interprétation selon le schéma classique en trois phases (paragraphe 7.2) devient délicate. Un palier de fluage anormalement prolongé, ou une rupture brutale et précoce de la sonde, doivent alerter sur une telle configuration plutôt que d'être mécaniquement intégrés au calcul de Pl^* et EM selon la procédure standard. Le recoupement avec le log lithologique détaillé du sondage carotté voisin (Chapitre 2) constitue, dans ce cas, l'élément de vérification le plus direct.

7.12 Place de l'essai dans le programme normatif complet

L'essai pressiométrique Ménard, bien qu'central dans la méthode française de dimensionnement (Partie V), ne dispense pas de la caractérisation par essais de laboratoire détaillée en Partie IV : les deux familles d'essais répondent à des questions complémentaires le comportement global in situ pour l'une, les mécanismes fins de compressibilité, de résistance au cisaillement et de plasticité pour l'autre et leur articulation, plutôt que la substitution de l'une à l'autre, constitue la pratique de référence recommandée par cet ouvrage pour tout projet dépassant la catégorie géotechnique la plus simple (Chapitre 14).

7.13 Conditions de site et accessibilité de l'équipement

L'exécution de l'essai pressiométrique requiert l'accès du matériel de forage et de mesure au point de sondage, une contrainte parfois sous-estimée en phase de programmation d'une campagne sur des terrains difficilement accessibles (zones inondables saisonnières, terrains en forte pente, emprises urbaines denses). La planification de la campagne d'investigation (Chapitre 1) doit intégrer cette contrainte logistique au même titre que la seule contrainte scientifique de densité de sondages, sous peine de compromis non documentés sur l'implantation réelle des essais par rapport à l'implantation initialement prévue.

7.14 Sécurité et qualification des opérateurs

La réalisation d'un essai pressiométrique dans des conditions normalisées suppose une qualification et une expérience spécifiques de l'opérateur de forage, distinctes de la seule compétence générale en sondage géotechnique : la sensibilité de l'essai aux conditions de forage préalable (paragraphe 7.4) signifie qu'un opérateur insuffisamment formé peut produire des résultats systématiquement biaisés sans qu'aucune anomalie ne soit détectable a posteriori sur la seule courbe pressiométrique. La qualification et la formation continue des opérateurs constituent ainsi un investissement de fiabilité qui se répercute directement sur la qualité de l'ensemble de la chaîne méthodologique décrite dans cet ouvrage.

7.15 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a établi l'essai pressiométrique Ménard comme l'instrument de mesure mécanique in situ de référence pour la méthodologie exposée dans cet ouvrage : principe physique et paramètres mesurés (paragraphe 7.1-7.2), indicateur structural complémentaire (paragraphe 7.3), exigences protocolaires et sources d'erreur (paragraphe 7.4-7.9), et conditions pratiques d'exécution sur le terrain (paragraphe 7.10-7.14). Le chapitre suivant exploite ces mesures ponctuelles pour construire une caractérisation mécanique continue de l'emprise du projet, indispensable au dimensionnement des fondations développé en Partie V.

Interpolation spatiale des paramètres mécaniques

8.1 De la mesure ponctuelle à la caractérisation continue

Un essai pressiométrique ne renseigne que le point et la profondeur où il a été réalisé. Or la conception d'un ouvrage de dimension significative requiert une connaissance du comportement mécanique du sol sur l'ensemble de son emprise. L'application des principes du Chapitre 3 aux paramètres Pl^* et EM permet de krigéer ces grandeurs sur une grille tridimensionnelle, produisant une estimation continue des caractéristiques mécaniques en tout point sondé ou non.

8.2 Justification scientifique de la réduction du nombre de sondages

Cette capacité présente une portée pratique directe pour les projets à grande emprise : elle permet de justifier scientifiquement, par la variance d'estimation associée au modèle interpolé, une réduction raisonnée du nombre de sondages supplémentaires nécessaires là où la pratique courante procède par extrapolation empirique non quantifiée. Les validations conduites sur plusieurs sites sénégalais révèlent par ailleurs des contrastes mécaniques significatifs entre formations voisines, démontrant que le jugement d'expert seul ne peut restituer l'hétérogénéité réelle du sous-sol à l'échelle d'un site : l'interpolation spatiale rigoureuse n'est pas une option de confort, mais une exigence de rigueur scientifique.

8.3 Représentation graphique : la coupe pressiométrique

La représentation normalisée des résultats pressiométriques sous forme de coupe verticale Pl^* et EM tracés en fonction de la profondeur, avec identification des zones de faciès homogènes constitue le support de communication usuel entre le géotechnicien et le concepteur de l'ouvrage. Cette représentation, associée au log lithologique du sondage, est développée au Chapitre 18.

8.4 Spécificités de l'interpolation des grandeurs mécaniques

L'interpolation géostatistique de Pl^* et EM appelle deux précautions spécifiques, distinctes de celles applicables à l'interpolation d'une profondeur de contact

(Chapitre 5). D'une part, ces grandeurs varient fréquemment sur plusieurs ordres de grandeur entre formations contrastées (d'un sol mou à un horizon induré), ce qui peut justifier un krigeage opéré sur le logarithme de la grandeur plutôt que sur sa valeur brute, afin de stabiliser la variance et d'éviter qu'une formation très résistante localisée ne domine excessivement l'ajustement du variogramme. D'autre part, ces grandeurs sont par nature dépendantes de la lithologie : leur krigeage gagne en pertinence lorsqu'il est mené séparément au sein de chaque domaine lithologique identifié par le modèle géologique (Chapitres 4 et 5), plutôt que globalement sur l'ensemble du site sans distinction de faciès une approche parfois qualifiée de krigeage avec dérive externe lithologique.

8.5 Exemple illustratif

Considérons un site où les sondages pressiométriques révèlent, au sein d'un même horizon latéritique, des valeurs de Pl^* comprises entre 0,4 et 1,8 MPa selon la localisation un contraste cohérent avec l'hétérogénéité documentée des sols latéritiques ouest-africains (Chapitre 1). Une interpolation par simple moyenne arithmétique de ces valeurs masquerait cette variabilité spatiale et conduirait, en un point particulier, à une estimation potentiellement éloignée de la réalité locale ; un krigeage correctement ajusté restitue au contraire un gradient spatial cohérent avec la structure spatiale observée, assorti d'une variance d'estimation plus élevée précisément dans les zones où ce contraste est le moins bien renseigné par les sondages disponibles.

8.6 Validation croisée des grandeurs mécaniques interpolées

La validation Leave-One-Out présentée au Chapitre 6 pour la profondeur des contacts géologiques s'applique de façon identique à l'interpolation de Pl^* et EM, avec un bénéfice opérationnel direct : un RMSE de validation exprimé dans la même unité que le paramètre mécanique (le MPa, typiquement) permet de qualifier directement la marge de sécurité supplémentaire qu'il convient d'envisager dans le dimensionnement (Chapitre 15) lorsque ce paramètre est utilisé en un point non sondé plutôt qu'au droit d'un essai réel. Cette mise en relation explicite entre incertitude du modèle et marge de dimensionnement est un apport direct de la démarche géostatistique par rapport à une extrapolation visuelle non quantifiée.

8.7 Continuité avec le modèle géologique

L'interpolation des paramètres mécaniques ne doit jamais être conduite indépendamment du modèle géologique structural établi en Partie II : un même point de l'espace appartient à une lithologie déterminée par ce modèle, et c'est cette appartenance qui doit gouverner quel sous-ensemble de données pressiométriques est mobilisé pour l'estimation locale de Pl^* et EM. L'articulation entre les deux krigeages structural d'une part, mécanique d'autre part constitue ainsi une chaîne de modélisation cohérente, préférable à deux interpolations indépendantes dont la cohérence mutuelle ne serait pas garantie.

8.8 Extraction ponctuelle pour le dimensionnement

L'usage final le plus direct du modèle mécanique interpolé est l'extraction, au point exact d'implantation d'une fondation projetée et à la profondeur d'ancrage envisagée, des valeurs estimées de Pl^* et EM ainsi que de leur variance associée. Cette extraction ponctuelle, immédiate une fois le modèle construit, remplace la pratique antérieure consistant à retenir, pour le calcul, la valeur du sondage le plus proche ou une moyenne arithmétique non pondérée des sondages environnants deux pratiques qui ignorent l'une comme l'autre la structure spatiale de la variabilité mécanique mise en évidence dans ce chapitre.

8.9 Synthèse de la chaîne pressiométrique

Les Chapitres 7 et 8 referment ainsi un cycle méthodologique complet, de la mesure de terrain individuelle (Chapitre 7) à sa généralisation spatiale rigoureuse (présent chapitre) : ce cycle mesure normalisée, interpolation géostatistique, validation croisée, extraction ponctuelle pour le calcul constitue le modèle méthodologique répliqué, mutatis mutandis, pour l'ensemble des grandeurs géotechniques traitées dans cet ouvrage, des paramètres de laboratoire (Partie IV) à la profondeur des contacts géologiques (Partie II).

8.10 Cartographie comparée de plusieurs sites

Lorsque plusieurs sites voisins, investigués à des dates différentes, partagent un contexte géologique régional comparable, la juxtaposition de leurs modèles mécaniques interpolés respectifs permet une forme de validation croisée à l'échelle régionale, distincte de la validation Leave-One-Out interne à chaque site (Chapitre 6) : une cohérence d'ensemble entre sites voisins renforce la confiance dans la

représentativité des paramètres retenus pour la formation considérée, tandis qu'une divergence inexpliquée appelle un examen approfondi défaut d'étalonnage sur l'un des sites, ou variabilité géologique réelle à cette échelle, qu'il convient alors de documenter plutôt que d'arbitrer arbitrairement. Cette confrontation inter-sites préfigure, à petite échelle, la démarche de capitalisation régionale développée au Chapitre 23.

8.11 Sensibilité du dimensionnement à la qualité de l'interpolation

L'équation (15.1) du Chapitre 15 démontre que la contrainte de rupture calculée est directement proportionnelle à la pression limite nette retenue : une erreur relative de 20 % sur Pl_e^* un ordre de grandeur plausible pour une estimation interpolée en zone de faible densité de sondages se traduit par une erreur comparable sur la contrainte de rupture calculée, et donc sur la marge de sécurité réellement disponible. Cette sensibilité directe justifie, plus que pour toute autre grandeur traitée dans cet ouvrage, la rigueur apportée à l'interpolation des paramètres pressiométriques : une imprécision sur la profondeur d'un contact géologique (Partie II) introduit une erreur de position, généralement moins critique pour la sécurité globale de l'ouvrage qu'une erreur directe sur la grandeur même qui gouverne le calcul de capacité portante.

8.12 Recommandations de synthèse

- **Stratification par lithologie** krigéer Pl^* et EM séparément au sein de chaque domaine lithologique identifié, plutôt que globalement sur l'ensemble du site ;
- **Transformation des données** envisager une transformation logarithmique préalable lorsque la plage de valeurs observées s'étend sur plus d'un ordre de grandeur ;
- **Validation systématique** systématiser la validation croisée (Chapitre 6) sur les grandeurs mécaniques au même titre que sur la géométrie structurale, et documenter les deux dans le rapport final (Chapitre 21) ;
- **Traçabilité métrologique** documenter la méthode de forage et l'étalonnage de la sonde pour chaque essai mobilisé, condition de la comparabilité inter-sondages et inter-sites (paragraphe 8.10).

8.13 Anisotropie mécanique et orientation des ouvrages

À l'instar de la profondeur des contacts géologiques (Chapitre 3, paragraphe 3.4), les paramètres mécaniques pressiométriques peuvent présenter une anisotropie spatiale, notamment dans les formations sédimentaires structurées par leur mode de dépôt. Lorsque l'analyse variographique révèle une telle anisotropie, son orientation peut utilement informer le choix d'implantation d'ouvrages linéaires (voiries, réseaux enterrés) dont le tracé, orienté selon la direction de moindre variabilité mécanique plutôt que perpendiculairement à elle, réduit l'hétérogénéité de comportement du sol support le long de l'ouvrage.

8.14 Vers une base de données mécaniques régionale

À mesure que les modèles mécaniques interpolés se multiplient à l'échelle de la sous-région, leur agrégation par contexte géologique (Chapitre 23) permettrait de documenter, pour chaque grande famille de sol rencontrée dans la sous-région, des plages de référence de Pl^* et EM accompagnées de leur variabilité typique. Une telle base, construite progressivement plutôt qu'établie a priori, offrirait à tout nouveau projet un point de comparaison immédiat permettant de juger si les résultats obtenus sur un site donné s'inscrivent dans la plage de variabilité régionale connue ou signalent une particularité locale méritant un examen approfondi.

8.15 Synthèse de la partie

Les deux chapitres de cette partie ont établi l'essai pressiométrique Ménard comme l'instrument de mesure mécanique central de la méthodologie exposée dans cet ouvrage (Chapitre 7), puis ont étendu cette mesure ponctuelle à une caractérisation continue de l'emprise du projet par krigeage (présent chapitre). Cette extension spatiale n'est pas une simple commodité de représentation : elle conditionne directement la qualité du dimensionnement des fondations développé en Partie V, qui exploite Pl^* et EM en tout point d'implantation plutôt qu'au seul droit des sondages réalisés. La rigueur apportée à la mesure (Chapitre 7) et à son interpolation (présent chapitre) constitue ainsi un investissement dont le rendement se mesure à l'aune de la fiabilité de l'ensemble de la chaîne de dimensionnement qui en dépend.

8.16 Check-list avant exploitation pour le dimensionnement

- **Modèle géologique** le modèle géologique structural (Chapitres 4-5) est-il validé par Leave-One-Out avec des métriques jugées satisfaisantes (Chapitre 6) ?

- **Stratification mécanique** Pl* et EM ont-ils été krigés séparément par domaine lithologique (paragraphe 8.4) plutôt que globalement sur l'ensemble du site ?
- **Validation mécanique** la validation croisée a-t-elle été conduite spécifiquement sur les grandeurs mécaniques, et non uniquement sur la géométrie (paragraphe 8.6) ?
- **Traçabilité métrologique** la méthode de forage et l'étalonnage des sondes sont-ils documentés et cohérents entre les sondages mobilisés (paragraphe 8.10) ?

Cette check-list, destinée à être vérifiée avant toute transmission du modèle mécanique au calcul de dimensionnement (Partie V), formalise les exigences de qualité développées tout au long de cette partie sous une forme directement actionnable par l'ingénieur en charge du projet.

PARTIE IV : Méthodologie des essais de laboratoire

Limites d'Atterberg et identification des sols

9.1 Principe et protocole normatif

Les limites d'Atterberg caractérisent les teneurs en eau marquant la transition entre les états de consistance d'un sol fin : la limite de liquidité w_L sépare l'état liquide de l'état plastique, et la limite de plasticité w_P sépare l'état plastique de l'état solide. Le protocole d'essai, normalisé par la NF P 94-051 [10], repose sur l'appareil de Casagrande pour w_L et sur le roulement au filament pour w_P .

9.2 Indices dérivés et classification

De ces deux limites sont dérivés l'indice de plasticité, mesure de l'étendue du domaine plastique, et l'indice de liquidité, qui positionne l'état naturel du sol dans ce domaine :

$$I_p = w_L - w_P \quad ; \quad I_L = \frac{w - w_P}{I_p}$$

(9.1)

Ces indices, reportés sur le diagramme de Casagrande (indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité), permettent la classification du sol fin selon le Système de Classification Unifié des Sols (USCS, ASTM D2487) : argiles et limons de plasticité faible, moyenne ou élevée, séparés par la droite empirique dite « ligne A ». Cette classification conditionne directement le choix des essais complémentaires à conduire et les ordres de grandeur attendus pour la compressibilité (Chapitre 11) et la résistance au cisaillement (Chapitre 12).

Application aux argiles tropicales

Les argiles tropicales ouest-africaines présentent fréquemment des indices de plasticité élevés associés à un potentiel de gonflement significatif (Chapitre 13) une combinaison qui doit systématiquement alerter le concepteur sur le risque de tassements différentiels saisonniers en fondations superficielles.

9.3 Sensibilité du protocole et reproductibilité

La limite de liquidité, mesurée à la coupelle de Casagrande, dépend de paramètres opérationnels (nombre de coups nécessaires pour fermer la rainure normalisée, teneur en eau de l'échantillon testé) dont la maîtrise conditionne directement la reproductibilité du résultat entre opérateurs et laboratoires. Un même sol testé par deux opérateurs selon un protocole rigoureusement identique devrait produire des limites de liquidité concordantes à quelques points de pourcentage ; un écart plus important signale généralement un défaut de protocole (vitesse de fermeture de la rainure non normalisée, séchage partiel de l'échantillon) plutôt qu'une variabilité réelle du matériau.

9.4 Lien avec le potentiel de gonflement

Un indice de plasticité élevé est un indicateur non un substitut du potentiel de gonflement d'un sol fin. Des travaux de recherche dédiés à la prédiction du potentiel de retrait-gonflement ont montré que la combinaison de l'indice de plasticité avec d'autres descripteurs (la composition minéralogique de la fraction argileuse en particulier) améliore sensiblement la capacité prédictive par rapport à l'indice de plasticité seul, la smectite présentant un potentiel de gonflement nettement supérieur à celui de la kaolinite pour un indice de plasticité comparable [\[11\]](#). Cette nuance justifie que l'indice de plasticité serve de critère de présélection déclenchant, au-delà d'un seuil, un essai de gonflement libre dédié (Chapitre 13) plutôt que de base unique et suffisante à la décision de conception.

9.5 Insertion dans la chaîne de caractérisation

Les limites d'Atterberg constituent, dans la pratique courante, le premier essai d'identification réalisé sur un échantillon de sol fin, en amont des essais mécaniques plus coûteux en temps et en matériel détaillés aux chapitres suivants. Cette antériorité n'est pas seulement chronologique : elle est méthodologique, dans la mesure où la classification qui en résulte (paragraphe 9.2) oriente directement le choix et l'interprétation des essais ultérieurs un sol classé argile de forte plasticité appelant une attention particulière aux essais de gonflement (Chapitre 13) et de compressibilité (Chapitre 11), tandis qu'un sol grenu orientera davantage l'attention vers l'analyse granulométrique détaillée (Chapitre 10) et le cisaillement direct (Chapitre 12).

Analyse granulométrique

10.1 Détermination de la distribution granulométrique

L'analyse granulométrique détermine la distribution des tailles de grains constituant un sol, par tamisage pour les fractions sableuses et graveleuses (NF EN ISO 17892-4 [12]) et par sédimentométrie pour les fractions fines (NF P 94-057 [1]), fondée sur la loi de Stokes régissant la vitesse de sédimentation des particules en suspension.

Le passage du tamisage à la sédimentométrie s'opère généralement au tamis de 80 μm : au-delà, la séparation mécanique par tamisage reste fiable ; en deçà, la taille des particules devient trop faible pour une séparation mécanique directe, et c'est la vitesse de chute des particules en suspension dans une colonne d'eau, mesurée indirectement par densimétrie, qui permet de reconstituer la distribution des tailles. La continuité entre les deux courbes partielles (tamisage et sédimentométrie) doit être vérifiée au raccordement, un écart significatif signalant généralement un défaut de préparation de l'échantillon (dispersion incomplète des agrégats argileux avant sédimentométrie).

10.2 Diamètres caractéristiques et coefficients dérivés

De la courbe granulométrique cumulée sont extraits les diamètres D10, D30, D50 et D60 (diamètres correspondant respectivement à 10 %, 30 %, 50 % et 60 % de passants en masse), desquels sont dérivés le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad ; \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

(10.1)

Un coefficient d'uniformité élevé ($C_u > 4$ à 6 selon la classe granulaire) traduit un sol à granulométrie étalée, généralement favorable à un bon compactage ; un coefficient de courbure compris entre 1 et 3 signale une distribution régulière, sans

déficit ni excès d'une classe granulaire intermédiaire. Ces deux coefficients sont les critères discriminants de la classification USCS pour les sols grenus (familles G et S).

10.3 Application aux formations sablo-carbonatées côtières

Les formations sablo-carbonatées du littoral sénégalais présentent fréquemment des courbes granulométriques particulières, marquées par la présence de fragments bioclastiques (débris coquilliers) dont la forme anguleuse et la friabilité diffèrent sensiblement des grains de quartz classiques. Cette particularité granulométrique doit être documentée explicitement dans la description du faciès, la friabilité des bioclastes pouvant évoluer sous sollicitation mécanique (compactage, battage de pieux) d'une manière que la seule courbe granulométrique initiale ne permet pas d'anticiper.

10.4 Articulation avec la classification USCS complète

La classification USCS complète d'un sol combine les résultats de l'analyse granulométrique (présent chapitre) et des limites d'Atterberg (Chapitre 9) selon un arbre de décision normalisé : un sol est d'abord classé grenu ou fin selon la proportion de particules passant au tamis 80 μm , puis affiné par les coefficients C_u et C_c pour les sols grenus, ou par la position sur le diagramme de Casagrande pour les sols fins. Cette classification, bien qu'antérieure aux méthodes de modélisation décrites dans cet ouvrage, demeure le langage commun de description des sols entre laboratoires, bureaux d'études et maîtres d'ouvrage, et conditionne le choix des essais mécaniques complémentaires pertinents (Chapitres 11 à 13).

CHAPITRE 11

Essai œdométrique et théorie de la consolidation

11.1 Principe de l'essai et courbe de compressibilité

L'essai œdométrique (NF P 94-090-1 [\[13\]](#)) soumet un échantillon de sol fin, confiné latéralement, à des paliers de chargement axial croissants, et mesure le tassement résultant à chaque palier jusqu'à stabilisation. Le résultat est exprimé sous forme

de la courbe de compressibilité, indice des vides e en fonction du logarithme décimal de la contrainte effective appliquée σ' .

11.2 Indices de compressibilité et de gonflement

Cette courbe présente, en première charge, une branche dite vierge sensiblement linéaire dans le plan e - $\log(\sigma')$, dont la pente définit l'indice de compression C_c . La branche de décharge, plus plate, définit de manière analogue l'indice de gonflement (ou de recompression) C_s :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log_{10}(\sigma')} \text{ (branche vierge)} \quad ; \quad C_s = -\frac{\Delta e}{\Delta \log_{10}(\sigma')} \text{ (décharge)} \quad (11.1)$$

11.3 La pression de préconsolidation : construction de Casagrande

La pression de préconsolidation σ'_p marque la transition entre le domaine surconsolidé, où le sol a déjà subi historiquement une contrainte supérieure à la contrainte actuelle, et le domaine vierge. Sa détermination graphique, proposée par Casagrande, repose sur l'identification du point de courbure maximale de la courbe de compressibilité, puis sur la bissection de l'angle formé entre la tangente horizontale et la tangente à la courbe en ce point ; l'intersection de cette bissectrice avec le prolongement de la branche vierge donne σ'_p . La comparaison de σ'_p à la contrainte effective en place σ'_{v0} détermine l'état de consolidation du sol surconsolidé si $\sigma'_p > \sigma'_{v0}$, normalement consolidé dans le cas contraire —, une distinction dont le Chapitre 17 démontre le caractère déterminant pour le calcul de tassement.

11.4 Durée de l'essai et consolidation secondaire

Chaque palier de chargement doit être maintenu jusqu'à stabilisation du tassement, généralement atteinte en 24 heures pour les argiles courantes mais pouvant excéder ce délai pour les argiles très plastiques ou organiques. Le suivi du tassement en fonction du logarithme du temps à chaque palier permet de distinguer la consolidation primaire (expulsion de l'eau interstitielle, Chapitre 17) de la consolidation secondaire (réarrangement visqueux du squelette solide), cette dernière pouvant représenter une fraction non négligeable du tassement total sur le temps long pour certaines argiles tropicales riches en minéraux argileux gonflants.

11.5 Exploitation pratique de la courbe de compressibilité

Au-delà des seuls indices C_c , C_s et de la pression de préconsolidation, la courbe de compressibilité complète permet d'estimer le coefficient de consolidation c_v , qui gouverne la cinétique du tassement dans le temps (distinct de son amplitude finale, traitée au Chapitre 17). Cette donnée cinétique est particulièrement pertinente pour les ouvrages sensibles au phasage des travaux remblais sur sol mou, par exemple où la vitesse de tassement conditionne le calendrier de construction autant que son amplitude finale.

11.6 Remaniement de l'échantillon et précautions de prélèvement

La courbe de compressibilité obtenue dépend fortement de l'état de remaniement de l'échantillon testé : un échantillon prélevé par carottier à paroi mince et manipulé avec soin préserve la structure naturelle du sol, tandis qu'un échantillon remanié lors du prélèvement ou du transport présente une courbe de compressibilité plus régulière, sans la rupture de pente nette caractéristique de la pression de préconsolidation (paragraphe 11.3) la structure naturelle qui produit cette rupture de pente ayant été détruite avant l'essai. Une courbe anormalement régulière, dépourvue de coude net, doit donc alerter sur une possible altération de l'échantillon plutôt que d'être interprétée comme l'absence réelle de préconsolidation.

11.7 Synthèse des indices de compressibilité par horizon

La constitution progressive, à l'échelle d'un site puis d'une région (Chapitre 23), d'une base de valeurs typiques de C_c , C_s et σ'_p par horizon géologique répertorié permettrait, à terme, de fournir des valeurs a priori raisonnables pour l'estimation préliminaire d'un tassement avant même la réalisation d'essais œdométriques spécifiques au projet utile en phase d'avant-projet, mais qui ne saurait se substituer aux essais réels avant tout dimensionnement final, ces valeurs a priori demeurant, par construction, moins fiables que la mesure directe sur l'échantillon du site considéré.

11.8 Nombre de paliers et qualité de la définition du coude

La précision de la détermination de la pression de préconsolidation par la construction de Casagrande (paragraphe 11.3) dépend directement du nombre de paliers de chargement réalisés au voisinage de la zone de courbure maximale de la

courbe : un essai mené avec un nombre insuffisant de paliers dans cette zone critique produit une courbe imprécisément définie, rendant la construction graphique elle-même sujette à une incertitude d'interprétation significative. La norme NF P 94-090-1 [\[13\]](#) recommande à cet égard un resserrement des paliers de chargement précisément dans la zone où la courbure du graphe est attendue la plus marquée, plutôt qu'une progression de charge strictement géométrique uniforme sur toute la plage d'essai.

CHAPITRE 12

Essai de cisaillement direct

12.1 Principe de l'essai

L'essai de cisaillement direct à la boîte (NF P 94-071-1 [\[14\]](#)) soumet un échantillon à une contrainte normale constante tout en imposant un déplacement horizontal relatif entre deux demi-boîtes, jusqu'à rupture. Répété pour plusieurs niveaux de contrainte normale, l'essai détermine l'enveloppe de rupture du sol.

12.2 Le critère de Mohr-Coulomb

L'enveloppe de rupture est classiquement linéarisée selon le critère de Mohr-Coulomb, qui exprime la contrainte de cisaillement à la rupture τ en fonction de la contrainte normale effective σ' :

$$\tau = c' + \sigma' \tan(\varphi') \quad (12.1)$$

où c' désigne la cohésion effective et φ' l'angle de frottement interne effectif du sol les deux paramètres fondamentaux de résistance au cisaillement utilisés dans la quasi-totalité des vérifications de stabilité géotechnique, de la portance des fondations à la stabilité des talus [\[15\]](#).

12.3 Limites de l'essai et essais complémentaires

L'essai de cisaillement direct impose un plan de rupture horizontal prédéterminé par la géométrie de la boîte, qui ne correspond pas nécessairement au plan de rupture

réel d'un ouvrage. Il ne permet pas non plus le contrôle direct de la pression interstitielle pendant l'essai, ce qui limite son interprétation aux conditions drainées. Pour les sols fins saturés sollicités rapidement (remblai de grande hauteur construit en quelques semaines, par exemple), un essai triaxial non drained (UU) ou consolidé non drainé (CU), non détaillé dans cette édition, complète utilement la caractérisation extension méthodologique évoquée au Chapitre 23 parmi les développements futurs envisagés pour cet ouvrage.

12.4 Cohésion apparente et cohésion effective

Une vigilance particulière doit être portée à la distinction entre cohésion apparente (mesurée sur un échantillon partiellement saturé, incluant un effet de succion capillaire transitoire) et cohésion effective au sens de Mohr-Coulomb. La première peut conduire à surestimer significativement la résistance au cisaillement à long terme d'un sol fin compacté si elle est utilisée sans précaution dans un calcul de stabilité, en particulier pour les sols résiduels tropicaux qui peuvent présenter une cohésion apparente notable à l'état naturel, partiellement perdue lors de cycles d'humidification-séchage.

12.5 Préparation et représentativité de l'échantillon

La validité de l'essai de cisaillement direct repose entièrement sur la représentativité de l'échantillon testé par rapport au sol en place : un échantillon remanié lors du prélèvement, ou reconstitué en laboratoire à une densité différente de la densité naturelle, produira des paramètres c' et φ' qui ne caractérisent plus le sol réel mais l'échantillon reconstitué. Cette exigence de représentativité, déjà soulignée pour l'essai œdométrique (Chapitre 11), revêt une importance particulière pour les sols résiduels structurés (latérites indurées, Chapitre 1), dont la résistance au cisaillement peut dépendre significativement d'une structure ou d'une cimentation naturelle détruite par un prélèvement non soigné.

12.6 Vitesse de cisaillement et conditions drainées

La vitesse de déplacement imposée lors de l'essai doit être suffisamment lente pour garantir des conditions drainées tout au long du cisaillement condition d'interprétation des paramètres c' et φ' comme paramètres effectifs (paragraphe 12.2). Pour les sols fins peu perméables, cette vitesse doit être adaptée à la perméabilité du matériau testé, sous peine de développer des surpressions

interstitielles résiduelles qui biaiserait l'interprétation des résultats vers des valeurs non représentatives du comportement à long terme du sol en place.

CHAPITRE 13

Essai de gonflement libre

13.1 Principe et protocole

L'essai de gonflement libre à l'œdomètre (NF P 94-091 [\[16\]](#)) mesure la déformation verticale d'un échantillon de sol fin soumis à une humidification progressive sous charge constante, sans confinement latéral additionnel. Il complète l'essai œdométrique classique (Chapitre 11) pour les sols argileux susceptibles de gonflement.

13.2 Potentiel de gonflement et implications pour la conception

Le potentiel de gonflement ainsi déterminé, mis en relation avec l'indice de plasticité (Chapitre 9), permet de classer le risque de gonflement du sol selon des grilles d'appréciation usuelles (faible, moyen, fort, très fort). Ce risque conditionne directement les dispositions constructives à adopter pour les fondations superficielles en zone argileuse profondeur d'ancrage minimale, dispositifs de désolidarisation, drainage périphérique particulièrement pertinentes dans les contextes argileux tropicaux de la sous-région.

13.3 Minéralogie argileuse et amplitude du gonflement

L'amplitude du gonflement observé pour un même indice de plasticité dépend fortement de la nature minéralogique de la fraction argileuse : les argiles à smectite (montmorillonite) présentent un potentiel de gonflement nettement supérieur à celles dominées par la kaolinite, pour des indices de plasticité pourtant comparables. Un indice de gonflement prédictif combinant plasticité, indice de gonflement libre et, lorsque disponible, capacité d'échange cationique a été proposé dans la littérature pour améliorer la fiabilité de cette prédiction par rapport à l'usage de l'indice de plasticité seul [\[11\]](#). Cette nuance minéralogique, rarement

mesurée en routine dans la sous-région, constitue une piste d'amélioration de la caractérisation des argiles tropicales identifiée au Chapitre 23.

13.4 Dispositions constructives associées

Au-delà du seul dimensionnement des fondations, la maîtrise du risque de gonflement passe par des dispositions constructives éprouvées : profondeur d'ancrage des fondations superficielles au-delà de la zone de variation hydrique saisonnière, vide sanitaire ou dispositif de désolidarisation entre dallage et structure porteuse, drainage périphérique limitant les variations locales de teneur en eau au pourtour de l'ouvrage, et végétalisation maîtrisée à proximité des fondations la croissance et le dessèchement racinaire d'arbres proches étant une cause fréquente de variation hydrique localisée et de tassement ou gonflement différentiel associé.

13.5 Synthèse de la partie : cinq essais, une caractérisation complète

Les cinq chapitres de cette partie couvrent l'ensemble des essais de laboratoire fondamentaux pour la caractérisation géotechnique d'un sol fin à grenu : identification et plasticité (Chapitre 9), granulométrie (Chapitre 10), compressibilité (Chapitre 11), résistance au cisaillement (Chapitre 12) et potentiel de gonflement (Chapitre 13). Aucun de ces essais ne se substitue aux autres : leur complémentarité, systématiquement rappelée tout au long de cette partie, constitue la condition d'une caractérisation géotechnique complète, sur laquelle peuvent ensuite s'appuyer en toute confiance le dimensionnement des fondations (Partie V) et l'interprétation des essais pressiométriques in situ (Partie III), les deux approches se corroborant mutuellement plutôt que se substituant l'une à l'autre.

13.6 Programme d'essais minimal recommandé

Catégorie de sol identifiée	Essais recommandés en priorité
Sol grenu (sable, grave)	Granulométrie complète (Ch. 10), cisaillement direct (Ch. 12)
Sol fin de plasticité faible à moyenne	Atterberg (Ch. 9), œdométrique (Ch. 11), cisaillement (Ch. 12)
Sol fin de plasticité élevée	Atterberg (Ch. 9), gonflement libre (Ch. 13), œdométrique (Ch. 11)
Sol résiduel structuré (latérite indurée)	Ensemble des cinq essais, prélèvement non remanié prioritaire

Ce programme minimal, à adapter selon la catégorie géotechnique de l'ouvrage (Chapitre 14) et le contexte géologique rencontré, offre un point de départ raisonnable pour la planification d'une campagne d'essais de laboratoire, sans dispenser d'un jugement d'ingénieur spécifique à chaque projet.

PARTIE V : Dimensionnement des fondations

Le cadre de l'Eurocode 7

14.1 Principes généraux

L'Eurocode 7 (NF EN 1997-1 [2]) établit le cadre réglementaire européen transposé en normes d'application nationale françaises directement pertinentes pour la pratique en zone UEMOA pour la justification des ouvrages géotechniques. Il repose sur la vérification d'états-limites, ultimes (rupture) et de service (déformation excessive), au moyen de coefficients partiels de sécurité appliqués séparément aux charges, aux résistances et aux paramètres de sol selon l'approche de calcul retenue.

14.2 Catégories géotechniques et niveau d'investigation

L'Eurocode 7 lie explicitement le niveau d'investigation requis (Chapitre 1) à la catégorie géotechnique de l'ouvrage, fonction de sa complexité, du risque associé et de la difficulté du contexte de sol. Cette gradation justifie, pour les ouvrages courants en contexte géologique bien caractérisé, le recours à des méthodes de calcul semi-empiriques directement fondées sur l'essai pressiométrique objet des deux chapitres suivants.

14.3 Coefficients partiels et approches de calcul

La vérification d'un état-limite ultime selon l'Eurocode 7 s'opère par application de coefficients partiels de sécurité, distincts selon qu'ils s'appliquent aux actions (charges), aux résistances du terrain ou aux paramètres de sol eux-mêmes. Trois approches de calcul sont définies par le texte européen, qui combinent ces coefficients selon des modalités différentes ; le choix de l'approche retenue relève de l'annexe nationale applicable. Dans l'attente d'une annexe nationale propre à chaque État membre de l'UEMOA, la pratique régionale s'appuie largement sur l'approche et les valeurs de coefficients partiels publiées dans les normes d'application nationale françaises (NF P 94-261 et NF P 94-262), une transposition pragmatique qui appelle, à terme, une validation propre au contexte régional enjeu développé au Chapitre 23.

14.4 États-limites de service et critère de déformation

Au-delà de la vérification de la rupture (état-limite ultime), l'Eurocode 7 exige la vérification d'un état-limite de service, généralement gouverné par le tassement admissible de l'ouvrage plutôt que par sa capacité portante ultime. Pour les sols compressibles caractérisés en Partie IV (essais œdométriques), c'est fréquemment ce second critère qui devient dimensionnant, en particulier pour les structures sensibles aux tassements différentiels un cas de figure fréquent sur les formations argileuses et sédimentaires de la sous-région.

14.5 Méthodes prescriptives et méthodes de calcul

L'Eurocode 7 admet, pour les ouvrages les plus simples relevant de la catégorie géotechnique 1, le recours à des règles prescriptives et à l'expérience comparable, sans calcul explicite de capacité portante. Cette souplesse, pertinente pour des ouvrages courants en contexte de sol bien connu, ne doit cependant pas être confondue avec une dispense générale d'investigation : l'expérience comparable invoquée suppose elle-même une connaissance préalable, documentée et vérifiée, du comportement de constructions antérieures sur un contexte géologique similaire exige que la dispersion actuelle de la donnée géotechnique régionale (Chapitre 2) rend, en pratique, difficile à satisfaire de façon rigoureuse dans une grande partie de la sous-région.

14.6 Synthèse du cadre normatif retenu dans cet ouvrage

Les chapitres suivants de cette partie retiennent systématiquement la méthode pressiométrique Ménard comme méthode de calcul de référence, conformément à la pratique dominante de la sous-région héritée de la tradition normative française. Ce choix méthodologique, cohérent avec la place centrale donnée à l'essai pressiométrique en Partie III, n'exclut pas le recours à d'autres méthodes de calcul reconnues par l'Eurocode 7 lorsque le contexte du projet le justifie ; il reflète la pratique la plus répandue et la mieux documentée dans le contexte ouest-africain actuel.

14.7 Statut réglementaire dans les différents États de l'UEMOA

L'adoption formelle de l'Eurocode 7 par opposition à son usage de fait comme référentiel de bonne pratique varie selon les pays de la sous-région, certains disposant de codes de construction nationaux antérieurs encore en vigueur, d'autres

ayant engagé une transposition partielle ou complète du cadre européen. Cette hétérogénéité réglementaire, distincte de l'hétérogénéité géologique traitée par ailleurs dans cet ouvrage, constitue un paramètre que l'ingénieur doit vérifier spécifiquement pour chaque projet selon sa localisation, au même titre que le contexte géotechnique local.

CHAPITRE 15

Fondations superficielles par la méthode pressiométrique

15.1 Domaine d'application

La méthode pressiométrique Ménard, normalisée pour les fondations superficielles par la NF P 94-261 [17], s'applique aux semelles isolées, filantes et aux radiers. Elle présente l'avantage déterminant de fonder le calcul directement sur les paramètres mesurés in situ (Pl^* , EM), sans nécessiter d'hypothèses sur des paramètres intrinsèques du sol difficiles à déterminer de manière fiable dans des formations hétérogènes.

15.2 Capacité portante

La contrainte de rupture sous la fondation est exprimée, selon la méthode Ménard, en fonction de la pression limite nette équivalente Pl_e^* mesurée sous la base de la fondation et d'un facteur de portance k_p dépendant de la nature du sol et de l'encastrement relatif de l'ouvrage :

$$q_u = q_0 + k_p \cdot Pl_e^* \quad (15.1)$$

où q_0 désigne la contrainte verticale totale au niveau de la base de la fondation avant travaux. Le facteur de portance k_p , tabulé par l'Eurocode 7 et la NF P 94-261 selon la nature du sol et l'élancement de l'encastrement, traduit l'effet favorable du confinement latéral apporté par le sol environnant.

15.3 Alimentation du calcul par le modèle 3D

L'intérêt méthodologique de coupler ce calcul au modèle géostatistique de la Partie II est direct : le contexte géologique (nature et épaisseur des couches sous la fondation projetée) et les paramètres mécaniques (Pl^* , EM) au point exact d'implantation peuvent être extraits du modèle interpolé, sans nouvelle saisie ni approximation par extrapolation visuelle d'un sondage voisin.

15.4 Exemple illustratif de calcul

Considérons une semelle filante ancrée à 1,2 m de profondeur dans une formation latéritique, pour laquelle le modèle interpolé (Chapitre 8) fournit, au droit de l'ouvrage, une pression limite nette équivalente Pl_e^* de 0,85 MPa. Pour un facteur de portance k_p de l'ordre de 1,1 (valeur typique d'une semelle filante peu encastree dans ce type de formation selon les abaques de la NF P 94-261) et une contrainte verticale totale q_0 de 0,02 MPa avant travaux, la contrainte de rupture q_u obtenue par l'équation (15.1) s'établit autour de 0,955 MPa. L'application du coefficient partiel de résistance propre à l'approche de calcul retenue conduit alors à la contrainte de calcul admissible, à comparer à la contrainte transmise par l'ouvrage projeté. Cet exemple, volontairement simplifié, illustre la dépendance directe du résultat final à la qualité du paramètre Pl_e^* injecté d'où l'importance accordée, aux Chapitres 7 et 8, à la rigueur de sa mesure et de son interpolation.

15.5 Radiers et interaction sol-structure

Pour les ouvrages de grande emprise fondés sur radier, l'hétérogénéité spatiale du sol précisément cartographiée par le modèle géostatistique de la Partie II peut induire des tassements différentiels significatifs entre différentes zones d'un même radier, même en l'absence de toute non-uniformité de charge. La cartographie de variance (Chapitre 4) constitue, dans ce cas, un outil de vérification complémentaire à la seule valeur moyenne des paramètres mécaniques : un radier reposant sur une zone de forte variance mécanique appelle une vérification renforcée de sa rigidité ou un maillage de calcul plus fin de l'interaction sol-structure.

15.6 Semelles filantes sur sol hétérogène

Une semelle filante de grande longueur traverse fréquemment, sur un même linéaire, plusieurs zones de capacité portante différente lorsque le site présente l'hétérogénéité latérale caractéristique des formations latéritiques ou côtières. Le

calcul de capacité portante mené en plusieurs points le long de la semelle, à partir du modèle interpolé plutôt qu'en un unique point représentatif supposé, permet d'identifier les segments nécessitant un renforcement local (élargissement de la semelle, approfondissement de l'ancrage) sans sur-dimensionner uniformément l'ensemble de l'ouvrage sur l'hypothèse la plus défavorable.

15.7 Vérification au glissement et charges horizontales

Au-delà de la seule vérification de la capacité portante verticale traitée dans ce chapitre, les fondations soumises à des charges horizontales significatives (effets du vent sur structures élancées, charges sismiques le cas échéant) nécessitent une vérification complémentaire au glissement, mobilisant le frottement à l'interface entre la base de la fondation et le sol support. La cohésion et l'angle de frottement effectifs déterminés au Chapitre 12 interviennent directement dans cette vérification, illustrant une nouvelle fois l'articulation nécessaire entre essais de laboratoire et essais in situ pour un dimensionnement complet.

CHAPITRE 16

Fondations profondes par la méthode pressiométrique

16.1 Domaine d'application

Pour les ouvrages nécessitant un transfert de charge à des formations profondes résistantes pieux, micro-pieux —, la NF P 94-262 [\[18\]](#) établit le cadre normatif de la méthode pressiométrique adaptée aux fondations profondes.

16.2 Résistance de pointe et frottement latéral

La capacité portante d'un élément de fondation profonde combine une résistance de pointe q_p , mobilisée à la base de l'élément et fonction de la pression limite nette mesurée à cette profondeur, et un frottement latéral unitaire q_s , mobilisé le long du fût et déterminé par abaque en fonction du couple (Pl^* , nature du sol et du matériau de l'élément) selon les courbes normalisées de la méthode Ménard. La

résistance totale en compression résulte de la somme pondérée de ces deux contributions sur les hauteurs de sol traversées pertinentes.

16.3 Choix entre solutions superficielles, semi-profondes et profondes

Le choix entre une solution superficielle, semi-profonde (puits, adaptée aux sols hétérogènes de la sous-région lorsque les formations portantes sont présentes à profondeur modérée) ou profonde résulte de la confrontation entre la capacité portante requise par l'ouvrage et le profil mécanique du site tel qu'établi par le modèle interpolé. Cette confrontation, menée systématiquement plutôt que par défaut au profit d'une solution unique, constitue une optimisation technico-économique directe du projet.

16.4 Frottement négatif et effet de groupe

Deux phénomènes propres aux fondations profondes méritent une attention particulière dans les contextes de sol compressible décrits aux Chapitres 11 et 17 : le frottement négatif, qui se développe le long du fût d'un pieu traversant une couche en cours de consolidation (le sol tassant davantage que le pieu, le frottement latéral s'inverse et devient une charge additionnelle plutôt qu'une résistance), et l'effet de groupe, qui réduit la capacité portante unitaire de chaque pieu d'un groupe rapproché par rapport à un pieu isolé équivalent, du fait du chevauchement des zones de sol mobilisées. Ces deux effets, fréquemment omis dans une première approche de dimensionnement, peuvent réduire significativement la capacité réellement disponible par rapport à la somme des capacités individuelles calculées en première approximation.

16.5 Vérification de l'ancrage par le modèle 3D

La vérification que la pointe d'un pieu est effectivement ancrée dans la formation portante visée et non, par exemple, dans une lentille résistante locale surmontant une couche plus faible non détectée par le sondage le plus proche bénéficie directement de la représentation tridimensionnelle du modèle géologique (Chapitres 4 et 5) : la visualisation du profil de sol exact au droit de chaque point d'implantation, plutôt que la seule extrapolation du sondage le plus proche, réduit le risque d'ancrage dans une formation non représentative du comportement à long terme attendu.

16.6 Essais de chargement et calibration in situ

Pour les ouvrages d'importance ou les contextes géologiques peu documentés, un essai de chargement statique sur pieu d'essai, réalisé préalablement à la généralisation à l'ensemble des fondations de l'ouvrage, demeure la méthode de vérification la plus directe de la capacité portante réelle. La confrontation du résultat de cet essai à la prédiction issue de la méthode pressiométrique (paragraphe 16.2) permet, le cas échéant, de recalibrer localement les coefficients utilisés pour les pieux restants du même ouvrage une démarche de validation directe complémentaire à la validation statistique du modèle géologique (Chapitre 6), portant cette fois sur le modèle de calcul de capacité portante lui-même plutôt que sur le seul modèle géologique.

16.7 Synthèse de la partie : du paramètre mesuré à l'ouvrage dimensionné

Les quatre chapitres de cette partie ont parcouru l'intégralité du chemin normatif qui conduit du cadre général de l'Eurocode 7 (Chapitre 14) au dimensionnement effectif des fondations superficielles (Chapitre 15) et profondes (présent chapitre), puis à la vérification des tassements associés (Chapitre 17). Ce cheminement illustre, de façon concrète, l'articulation annoncée dès l'introduction de cet ouvrage entre les parties scientifiques (II et III, modélisation géostatistique et pressiométrie) et leur traduction opérationnelle en décision d'ingénierie : aucun des calculs présentés dans cette partie n'aurait de valeur sans la rigueur apportée, en amont, à la caractérisation du sous-sol.

CHAPITRE 17

Calcul des tassements de consolidation

17.1 La théorie de la consolidation

Le tassement d'un massif de sol fin soumis à un accroissement de contrainte résulte, selon la théorie de la consolidation de Terzaghi (1925), de l'expulsion progressive de l'eau interstitielle sous l'effet du surcroît de contrainte effective transmis au

squelette solide. L'amplitude de ce tassement est directement gouvernée par les indices de compressibilité déterminés au Chapitre 11.

17.2 Trois régimes selon l'état de consolidation

Le calcul du tassement primaire d'une couche d'épaisseur H , d'indice des vides initial e_0 , soumise à un accroissement de contrainte $\Delta\sigma$ portant la contrainte effective de σ'_{v0} à $\sigma'_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma$, dépend de la position de σ'_p (Chapitre 11) par rapport à cet intervalle de contrainte :

Sol normalement consolidé ($\sigma'_p \leq \sigma'_{v0}$)

$$s = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (17.1)$$

Sol surconsolidé, domaine élastique ($\sigma'_f \leq \sigma'_p$)

$$s = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (17.2)$$

Sol surconsolidé avec dépassement de σ'_p ($\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_f$)

$$s = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \right) + \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log_{10} \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_p} \right) \quad (17.3)$$

Point de vigilance : ne jamais appliquer C_c par défaut

Appliquer systématiquement l'indice de compression C_c à l'ensemble de l'intervalle de contrainte, sans vérifier la position de σ'_p , conduit à une surestimation potentiellement considérable du tassement pour un sol surconsolidé l'indice de gonflement C_s étant typiquement cinq à dix fois inférieur à C_c . La détermination rigoureuse de l'état de consolidation (Chapitre 11) n'est donc pas une formalité académique : elle conditionne directement la justesse économique du dimensionnement.

17.3 Exemple illustratif

Considérons une couche argileuse d'épaisseur $H = 3$ m, d'indice des vides initial $e_0 = 0,9$, de contrainte effective en place $\sigma'_{v0} = 0,08$ MPa, et de pression de préconsolidation $\sigma'_p = 0,14$ MPa déterminée par construction de Casagrande (Chapitre 11). Un ouvrage projeté induit un accroissement de contrainte $\Delta\sigma = 0,10$

MPa, portant la contrainte finale σ'_f à 0,18 MPa valeur qui dépasse σ'_p : le sol se trouve donc dans le régime mixte de l'équation (17.3), combinant une première phase dans le domaine surconsolidé (de σ'_{v0} à σ'_p , gouvernée par C_s) et une seconde phase dans le domaine vierge (de σ'_p à σ'_f , gouvernée par C_c). Pour $C_s = 0,03$ et $C_c = 0,28$ (ordres de grandeur plausibles pour une argile de plasticité moyenne), le tassement résultant calculé par l'équation (17.3) s'établit à environ 4,3 cm. Un calcul qui aurait, par erreur, appliqué C_c sur l'intégralité de l'intervalle $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_f$ aurait conduit à un tassement supérieur à 11 cm plus de deux fois et demi la valeur correcte –, illustrant concrètement l'avertissement méthodologique formulé ci-dessus.

17.4 Tassement total et tassement différentiel

Le tassement calculé par les formules de ce chapitre s'applique à une colonne de sol sous un point donné de la fondation. Pour un ouvrage étendu, le tassement différentiel l'écart entre les tassements calculés sous différents points de l'ouvrage est généralement plus dommageable pour la structure que le tassement absolu lui-même, en particulier pour les structures rigides ou les bâtiments comportant des éléments sensibles à la distorsion (cloisons, vitrages, équipements). La cartographie continue des paramètres de compressibilité, rendue possible par leur interpolation géostatistique (Chapitre 8), permet précisément d'anticiper ce tassement différentiel à l'échelle de l'emprise complète de l'ouvrage plutôt qu'en un unique point de référence.

17.5 Tassements de fondations profondes

Pour les fondations profondes (Chapitre 16), le tassement résulte de mécanismes distincts de ceux développés dans ce chapitre pour les fondations superficielles : déformation propre de l'élément de fondation sous charge axiale, et tassement du sol environnant mobilisé par frottement latéral, généralement de bien plus faible amplitude que le tassement de consolidation d'une fondation superficielle équivalente sur sol compressible. Cette différence constitue, au côté de la seule capacité portante (Chapitre 16), un argument supplémentaire en faveur des solutions profondes sur les contextes où le tassement de consolidation représente le critère dimensionnant principal.

17.6 Limites du modèle unidimensionnel

Les formules de ce chapitre reposent sur l'hypothèse d'une consolidation unidimensionnelle déformation et drainage verticaux uniquement raisonnable pour une couche d'extension latérale grande par rapport à son épaisseur et sous chargement étendu. Pour une fondation de dimension comparable à l'épaisseur de la couche compressible, des effets tridimensionnels (drainage latéral notamment) peuvent réduire le tassement réel par rapport à la prédiction unidimensionnelle, un raffinement que l'ingénieur doit apprécier au regard de la géométrie réelle du projet plutôt que d'appliquer mécaniquement le modèle le plus simple dans toutes les configurations.

17.7 Tassement et programmation des contrôles

L'estimation préalable de l'amplitude et de la cinétique du tassement (paragraphe 11.5) permet de définir un programme de suivi topographique adapté : fréquence des relevés de nivellement plus resserrée durant la phase où le tassement progresse le plus rapidement, espacée à mesure que la consolidation primaire s'achève. Ce programme de suivi, comparé périodiquement à la prédiction du modèle, constitue la confirmation a posteriori évoquée au paragraphe 24.6 et alimente, en cas d'écart significatif, une réévaluation des hypothèses de calcul avant qu'un désordre structurel ne se manifeste.

17.8 Synthèse des facteurs déterminants du tassement

Facteur	Origine	Effet sur le tassement
Épaisseur H de la couche	Stratigraphie (Ch. 5)	Proportionnel
Indice des vides initial e_0	Essai œdométrique (Ch. 11)	Inversement proportionnel
État de consolidation	Construction de Casagrande (Ch. 11)	Facteur 5 à 10 (C_c vs C_s)
Amplitude de la surcharge	Charge de l'ouvrage projeté	Logarithmique
Position du point dans le site	Interpolation géostatistique (Ch. 8)	Variable selon variance locale

Ce tableau récapitule, sans s'y substituer, les facteurs dont la détermination rigoureuse chacun développé dans un chapitre distinct de cet ouvrage conditionne

la fiabilité du calcul de tassement. Aucun de ces facteurs ne peut être négligé sans risque de biais significatif sur le résultat final, comme l'illustre l'exemple numérique du paragraphe 17.3.

PARTIE VI : Du modèle au livrable d'ingénierie

Représentation des coupes géologiques

18.1 Coupe brute et coupe interpolée

La coupe géologique 2D, support de représentation le plus ancien et le plus universellement compris de la profession, admet deux niveaux de lecture. La coupe dite brute juxtapose les colonnes lithologiques réelles des sondages traversés par le tracé, sans hypothèse sur l'espace qui les sépare : elle présente l'avantage de ne reposer sur aucune extrapolation, mais ne renseigne rien sur la continuité des formations entre sondages. La coupe interpolée, construite à partir du modèle géostatistique de la Partie II, restitue au contraire une représentation continue des contacts géologiques entre sondages, au prix d'une hypothèse de continuité qu'il appartient à l'ingénieur de qualifier au regard du contexte géologique local.

18.2 Précautions d'interprétation

Point de vigilance : la coupe interpolée n'est pas une mesure

Une coupe interpolée représente la lithologie la plus probable entre deux sondages, non une certitude. Lorsqu'une même lithologie réapparaît à des profondeurs distinctes et non contiguës dans un même sondage, sa représentation continue entre sondages voisins doit être traitée avec une prudence accrue : seule la carte de variance associée au modèle (Chapitre 4) permet de qualifier objectivement la fiabilité de cette continuité supposée.

18.3 Conventions graphiques et lisibilité

La lisibilité d'une coupe géologique repose sur un jeu de conventions partagées par la profession : une trame ou une couleur unique par lithologie, appliquée de façon cohérente sur l'ensemble des documents d'un même projet ; une échelle verticale généralement exagérée par rapport à l'échelle horizontale, pour rendre lisibles des épaisseurs de couches faibles au regard de l'extension latérale du site, à condition que ce facteur d'exagération soit explicitement indiqué pour éviter toute impression erronée de pendage des couches ; et un cartouche rappelant systématiquement le site, la date, l'auteur et l'échelle, condition de traçabilité du document au même titre que les données qui l'ont produit (Chapitre 2).

18.4 La coupe pressiométrique comme complément

Lorsque les paramètres mécaniques interpolés (Chapitre 8) sont superposés à la coupe géologique, sous forme de profils de Pl* et EM tracés en regard de chaque colonne lithologique, le document obtenu permet une lecture conjointe de la nature du sol et de son comportement mécanique attendu une information directement exploitable par le concepteur de l'ouvrage sans consultation croisée de plusieurs documents séparés.

18.5 Choix du tracé de coupe

Le tracé d'une coupe n'est jamais neutre : il doit être positionné pour traverser le plus grand nombre de sondages pertinents et orienté selon la direction de variation géologique la plus significative du site (souvent perpendiculairement à la direction de plus grande continuité identifiée par l'analyse d'anisotropie du variogramme, Chapitre 3). Un tracé choisi arbitrairement, par exemple selon l'axe principal de l'emprise du projet sans considération géologique, risque de masquer une variabilité réelle perpendiculaire au tracé retenu.

18.6 Coupes multiples et couverture du site

Pour un site de dimension significative, une coupe unique ne restitue qu'une tranche de l'information disponible dans le modèle tridimensionnel complet (Chapitres 4 et 5). La production d'un jeu de coupes parallèles, espacées selon une maille adaptée à la taille du projet et complétées par une ou plusieurs coupes transversales, offre une couverture plus représentative de la variabilité du site qu'une coupe isolée au prix d'un volume de documents graphiques plus important, dont la gestion bénéficie directement de l'automatisation rendue possible par un modèle numérique structuré, par comparaison avec la production manuelle de chaque coupe individuellement.

18.7 Export et archivage des coupes

Les coupes produites à partir du modèle géostatistique devraient être archivées avec une référence explicite à la version du modèle dont elles sont dérivées (Chapitre 2) : un modèle réévalué après l'ajout de nouveaux sondages (paragraphe 6.7) produit des coupes potentiellement différentes de celles générées à partir d'une version antérieure, et la confusion entre deux versions de coupes représentant un même tracé à des dates différentes constitue une source d'erreur d'interprétation

documentée dans la pratique courante, en particulier lors de la reprise d'un dossier par une équipe n'ayant pas participé à l'étude initiale.

18.8 Synthèse du chapitre

La coupe géologique demeure, malgré l'enrichissement apporté par les cartes de probabilité et de variance tridimensionnelles (Chapitre 4), le support de communication le plus universellement compris entre géotechnicien, concepteur et maître d'ouvrage. Ce chapitre a montré qu'une coupe rigoureuse n'est pas une simple sortie graphique automatique du modèle, mais un document dont la construction (choix du tracé, conventions graphiques, gestion des versions) engage autant de jugement méthodologique que les calculs géostatistiques qui la sous-tendent.

CHAPITRE 19

Analyse volumétrique et cubature

19.1 Du modèle 3D au calcul de volumes

Le modèle voxel issu du krigeage d'indicatrice (Chapitre 4) permet, par simple sommation des volumes élémentaires associés à chaque lithologie sur une emprise définie, de calculer le volume de chaque formation rencontrée sur un site. Cette capacité, directe conséquence de la discrétisation volumique du modèle, transforme une question usuellement résolue par approximation grossière le volume de déblai ou de matériau à traiter pour un terrassement en un calcul fondé sur la même donnée géotechnique que le reste de l'étude.

19.2 Applications pratiques

Cette analyse volumétrique trouve une application directe dans l'estimation des quantités de terrassement, le dimensionnement des volumes de matériaux de substitution en cas de sol impropre, et l'évaluation économique préliminaire de scénarios de fondation alternatifs sur un même site.

19.3 Incertitude volumétrique et propagation de la variance

Le volume calculé pour une formation donnée hérite de l'incertitude du modèle géologique dont il est dérivé : la carte de variance associée au krigeage d'indicatrice

(Chapitre 4) peut être propagée jusqu'au calcul de volume pour fournir, non une valeur unique, mais une fourchette de volumes plausibles une information bien plus utile pour la négociation d'un marché de terrassement que la seule valeur moyenne, en particulier sur les zones du site les moins densément sondées.

19.4 Cubature et compensation déblai-remblai

Le calcul volumétrique par formation permet, au-delà du seul terrassement général, d'anticiper la nature des matériaux extraits (latéritique, argileux, sableux) en fonction de la profondeur d'excavation projetée, et donc leur réutilisation potentielle en remblai sur le même site une démarche d'optimisation des mouvements de terre qui réduit à la fois le coût du projet et son empreinte environnementale par la limitation des apports et évacuations de matériaux extérieurs au site (Chapitre 1).

19.5 Cubature et phasage des terrassements

Pour les projets de grande emprise conduits en plusieurs phases, le découpage du modèle volumétrique par zone de phasage permet d'anticiper, phase par phase, les volumes de déblai et de remblai associés, et donc d'ordonnancer les mouvements de terre de façon à maximiser la réutilisation directe des matériaux d'une zone en cours de déblai vers une zone en cours de remblai, sans stockage intermédiaire ni double manutention. Cette planification fine, rendue possible par la résolution spatiale du modèle géostatistique (Chapitre 4), constitue un apport économique tangible de la modélisation 3D au-delà de son rôle dans la seule caractérisation géotechnique.

19.6 Précision attendue et comparaison aux méthodes traditionnelles

Les méthodes traditionnelles d'estimation volumétrique méthode des profils en travers, méthode des mailles régulières appliquée à un nombre restreint de sondages reposent sur une interpolation géométrique simple entre points de mesure, sans considération de la structure spatiale de la variabilité géologique (Chapitre 3). Le calcul volumétrique dérivé du modèle géostatistique ne se contente pas de reproduire ces méthodes avec un outil numérique différent : il en améliore la précision dans les configurations où la continuité géologique réelle diverge sensiblement d'une interpolation géométrique simple, en particulier pour les géologies discontinues traitées par krigeage d'indicatrice (Chapitre 4).

19.7 Cubature et négociation contractuelle

Le volume de déblai et de remblai estimé en phase d'étude constitue fréquemment la base contractuelle du marché de terrassement conclu avec l'entreprise de construction. Un écart significatif entre le volume contractuel et le volume réellement constaté en cours de chantier fréquent lorsque l'estimation initiale repose sur une méthode peu rigoureuse constitue une source récurrente de litige contractuel et de surcoût non anticipé. La documentation explicite, dans le rapport géotechnique (Chapitre 21), de la méthode d'estimation volumétrique retenue et de l'incertitude associée (paragraphe 19.3) offre une base de discussion objective entre maître d'ouvrage et entreprise en cas d'écart constaté, préférable à l'absence de toute référence méthodologique explicite.

19.8 Limites de l'approche volumétrique automatisée

Le calcul volumétrique automatisé décrit dans ce chapitre reste tributaire de la qualité du modèle géologique sous-jacent (Chapitre 4) : une zone insuffisamment sondée, où la variance d'estimation demeure élevée, produira un volume calculé certes disponible numériquement, mais dont la fiabilité doit être explicitement qualifiée plutôt que présentée avec la même assurance qu'un volume calculé dans une zone densément sondée. Cette exigence de transparence sur l'incertitude, déjà soulignée au paragraphe 19.3, mérite d'être rappelée ici : un chiffre de cubature, aussi précis paraisse-t-il à l'affichage numérique, n'est jamais meilleur que la donnée géotechnique dont il est dérivé.

CHAPITRE 20

Interopérabilité avec les environnements BIM et SIG

20.1 La continuité numérique entre investigation et conception

La valeur d'un modèle géologique 3D validé dépasse le seul rapport géotechnique : restitué dans des formats d'échange reconnus par l'industrie de la construction (formats standardisés d'échange de modèles de bâtiment, formats de maillage 3D,

formats vectoriels des systèmes d'information géographique), il devient un objet exploitable au même titre que les autres composantes du projet structure, réseaux, voirie dans les environnements de conception collaborative.

20.2 Fermer la boucle entre géotechnique et conception architecturale

Cette interopérabilité ferme la boucle numérique entre l'investigation géotechnique et la conception de l'ouvrage : le concepteur dispose directement du modèle de sous-sol validé, sans ressaisie ni réinterprétation manuelle d'un rapport papier une simplification qui réduit le risque d'erreur d'interface, fréquent aux points de jonction entre disciplines d'un projet de construction.

20.3 État de la normalisation des échanges géotechniques

L'intégration des données géotechniques dans les standards ouverts d'échange numérique du secteur de la construction demeure un domaine en évolution active : des travaux récents ont proposé l'extension de classes dédiées (représentation de sondages, de tranches géologiques et de modèles géologiques) au sein des standards d'échange de modèles de bâtiment, précisément pour combler l'absence historique de représentation native du sous-sol dans ces formats, conçus à l'origine pour les ouvrages hors sol [\[19\]](#). Des initiatives de normalisation internationale travaillent, en parallèle, à l'alignement des standards d'échange géospatial et des standards du bâtiment pour les objets géotechniques, signe que l'interopérabilité décrite dans ce chapitre constitue un axe de standardisation actif plutôt qu'un acquis figé.

20.4 Limites actuelles et prudence d'usage

Ces standards d'échange demeurent, à ce jour, plus matures pour la représentation géométrique d'un modèle géologique (volumes, surfaces de contact) que pour la représentation de l'incertitude associée (variance, probabilité) développée aux Chapitres 4 et 6 : un export vers un environnement BIM/SIG transmet généralement la géométrie la plus probable du modèle, sans nécessairement transmettre la qualification de sa fiabilité. L'utilisateur en aval de cet export architecte, ingénieur structure doit donc rester informé, par le rapport géotechnique (Chapitre 21) ou tout autre canal explicite, du niveau de confiance associé au modèle qu'il intègre dans sa propre maquette.

20.5 Export des volumes et des formations

Au-delà du seul modèle structural, les volumes par formation calculés au Chapitre 19 peuvent être restitués dans les mêmes environnements collaboratifs sous forme d'objets distincts associés à un matériau ou une classification, permettant leur exploitation directe par les outils de métré et de chiffrage utilisés par l'entreprise de construction une continuité numérique qui prolonge, jusqu'à la phase de réalisation, la valeur du modèle géotechnique initialement constitué pour les seuls besoins de la conception.

20.6 Maturité organisationnelle requise

L'exploitation effective de cette interopérabilité suppose, au-delà de la seule disponibilité technique des formats d'échange, une organisation de projet qui partage effectivement ces données entre les différents intervenants une pratique encore inégalement répandue dans le secteur de la construction régional, où la transmission de documents PDF non structurés demeure fréquente même lorsque des données structurées sont disponibles en amont. La généralisation progressive de cette pratique collaborative, plus organisationnelle que technique, conditionne en réalité davantage la réalisation du bénéfice décrit dans ce chapitre que la seule maturité des formats d'échange eux-mêmes.

CHAPITRE 21

Structuration du rapport géotechnique

21.1 Fonction du rapport dans la chaîne de décision

Le rapport géotechnique constitue le livrable de référence sur lequel s'appuient le maître d'ouvrage, le concepteur et, in fine, le contrôleur technique pour juger de l'adéquation du projet de fondation aux conditions de sol. Sa structuration identification du site et du contexte, synthèse des investigations, interprétation des résultats, recommandations de dimensionnement doit permettre une lecture à plusieurs niveaux de détail, du résumé exécutif à l'annexe technique exhaustive.

21.2 Traçabilité du raisonnement géotechnique

Un rapport géotechnique rigoureux documente explicitement le cheminement entre la donnée brute et la recommandation finale : données de sondage, paramètres dérivés, méthode de calcul retenue et sa justification normative, résultat et marge de sécurité associée. Cette traçabilité, plus qu'une exigence de forme, constitue la condition de la révisabilité du rapport en cas d'évolution du projet ou de découverte ultérieure remettant en question une hypothèse initiale.

21.3 Communiquer l'incertitude sans la dissimuler

Un rapport géotechnique qui présente ses conclusions sous forme de valeurs uniques, sans mention de la variance d'estimation ou des métriques de validation croisée (Chapitre 6) qui les accompagnent, prive le maître d'ouvrage d'une information pourtant disponible et pertinente pour sa propre appréciation du risque. La présentation systématique, même synthétique (par exemple sous forme d'un indice de confiance qualitatif accompagnant chaque recommandation chiffrée), constitue une bonne pratique de transparence scientifique qui distingue un rapport fondé sur une démarche quantifiée d'un rapport fondé sur le seul jugement d'expert non étayé.

21.4 Structure type d'un rapport géotechnique complet

- **Introduction et contexte** objectifs de l'étude, catégorie géotechnique de l'ouvrage, contexte géologique régional ;
- **Données et modèle** localisation et méthode des sondages, synthèse des résultats de laboratoire, présentation du modèle géostatistique et de sa validation ;
- **Interprétation** coupes géologiques, cartes de probabilité et de variance, paramètres mécaniques retenus pour le calcul ;
- **Dimensionnement** type de fondation retenu, justification normative, résultats de calcul et marges de sécurité associées ;
- **Conclusion et recommandations** synthèse opérationnelle destinée à un lecteur non spécialiste, recommandations pratiques pour la phase chantier.

Cette structure, qui peut être adaptée selon la complexité du projet, garantit qu'un même rapport puisse être lu à plusieurs niveaux de détail : une lecture rapide de l'introduction et de la conclusion pour un décideur, une lecture complète pour l'ingénieur d'exécution, et un accès aux données brutes pour tout bureau d'études amené à reprendre l'étude ultérieurement.

21.5 Le rapport comme document vivant

Un projet de construction évolue fréquemment entre la phase d'étude géotechnique initiale et son achèvement : modification du programme, découverte en cours de terrassement d'une configuration de sol non anticipée, adaptation du type de fondation décidée en phase d'exécution. Un rapport conçu selon les principes de traçabilité du paragraphe 21.2 données brutes, modèle, méthode de calcul et hypothèses clairement séparés et documentés peut être révisé à la marge pour intégrer une information nouvelle sans nécessiter une reprise intégrale de l'étude, ce qu'un rapport ne présentant que des conclusions finales, sans cette traçabilité, ne permet pas.

21.6 Restitution adaptée aux différents destinataires

Le rapport géotechnique complet, exhaustif sur le plan technique, n'est généralement pas le document le plus approprié pour l'ensemble de ses destinataires : un maître d'ouvrage institutionnel ou un organisme public (Chapitre 1) peut nécessiter une note de synthèse non technique centrée sur les risques identifiés et les recommandations opérationnelles, tandis que l'entreprise de construction en phase d'exécution a besoin d'extraits ciblés profondeur d'ancrage à respecter, dispositions constructives spécifiques (Chapitre 13) directement exploitables sur le chantier sans lecture de l'ensemble du dossier. La production de ces déclinaisons à partir d'un même socle de données tracées (paragraphe 21.2) garantit leur cohérence mutuelle, condition rarement satisfaite lorsque chaque déclinaison est rédigée indépendamment.

21.7 Archivage de long terme et accessibilité future

Au-delà de sa fonction immédiate de livrable de projet, le rapport géotechnique constitue une pièce d'archive dont la valeur peut se révéler des décennies plus tard, lors d'une extension de l'ouvrage, d'un changement d'usage, ou d'un sinistre dont l'instruction nécessite de reconstituer les hypothèses de conception initiales. Cette perspective de long terme justifie un archivage sous des formats numériques pérennes plutôt que dans des formats propriétaires susceptibles de devenir illisibles, et un classement permettant une recherche ultérieure efficace exigences qui rejoignent directement les principes de capitalisation de la donnée exposés au Chapitre 2 et à l'échelle régionale au Chapitre 23.

21.8 Synthèse de la partie

Les quatre chapitres de cette partie ont parcouru le chemin qui mène du modèle géostatistique validé (Parties II et III) au livrable final remis au maître d'ouvrage : représentation graphique fidèle et prudente (Chapitre 18), quantification volumétrique (Chapitre 19), interopérabilité numérique avec les autres disciplines du projet (Chapitre 20), et structuration documentaire du rapport lui-même (Chapitre 21). Ce chemin, souvent réduit dans la pratique courante à sa seule dimension graphique ou administrative, constitue en réalité une étape méthodologique à part entière, dont la rigueur conditionne directement la capacité du destinataire final concepteur, maître d'ouvrage, autorité de contrôle à fonder sa décision sur une information fidèle à l'incertitude réelle du sous-sol caractérisé.

21.9 Transition vers l'intelligence artificielle et la normalisation régionale

Le livrable géotechnique ainsi structuré constitue, comme l'illustrera la Partie VII, la matière première sur laquelle peut s'appuyer une assistance algorithmique correctement ancrée : un rapport dont les données, le modèle et les hypothèses sont tracés selon les principes de cette partie offre une base exploitable pour une telle assistance, là où un rapport ne présentant que des conclusions finales non documentées n'offrirait aucune matière fiable à ancrer.

21.10 Check-list de clôture du rapport

- **Traçabilité** chaque recommandation chiffrée est-elle reliée à la donnée et à la méthode de calcul qui la justifient (paragraphe 21.2) ?
- **Incertitude** les métriques de validation croisée du modèle géologique et mécanique sont-elles explicitement présentées (Chapitre 6, paragraphe 21.3) ?
- **Lisibilité** le rapport comporte-t-il une synthèse exécutive lisible par un destinataire non spécialiste (paragraphe 21.4) ?
- **Gestion de version** la version du modèle géostatistique sous-jacent aux coupes et figures est-elle identifiée sans ambiguïté (paragraphe 18.7) ?

Cette check-list de clôture, à l'image de celles proposées aux paragraphes 8.16 et 23.8 pour d'autres étapes de la chaîne méthodologique, formalise les exigences de cette partie sous une forme directement utilisable lors de la relecture finale d'un rapport avant sa transmission au maître d'ouvrage.

PARTIE VII : Aide à la décision et intelligence artificielle

L'assistance par IA ancrée en pratique géotechnique

22.1 Un cadre conceptuel : l'ancrage (grounding)

L'usage de systèmes d'intelligence artificielle générative en ingénierie géotechnique pose une exigence méthodologique préalable à toute considération d'usage : la distinction systématique entre trois sources de connaissance mobilisées dans une réponse les données réelles et actualisées du projet considéré, le corpus documentaire normatif applicable, et la connaissance générale, non vérifiée pour le cas d'espèce, du système sous-jacent. Cette discipline, désignée par le terme d'ancrage (grounding), conditionne la fiabilité de toute assistance algorithmique en contexte d'ingénierie.

22.2 Risques d'un usage non ancré

Point de vigilance

Un système d'assistance qui ne distingue pas explicitement ces trois sources de connaissance ou qui invente une réponse plutôt que de signaler l'absence d'information constitue un risque pour la décision d'ingénierie, potentiellement plus dommageable que l'absence d'assistance. L'exigence de fidélité aux sources doit être vérifiable, et non simplement déclarée.

22.3 L'IA comme copilote, non comme autorité de calcul

Le rôle approprié d'une assistance algorithmique en géotechnique est celui d'un outil de lecture et d'aide à l'interprétation capable, par exemple, de mettre en relation les résultats d'une validation croisée (Chapitre 6) avec les paramètres d'un essai de laboratoire pour nuancer une recommandation et non celui d'une autorité de calcul. La responsabilité du dimensionnement, de l'interprétation normative et de la recommandation finale demeure, en toute circonstance, celle de l'ingénieur géotechnicien qualifié.

22.4 Architecture conceptuelle d'une assistance ancrée

Sans entrer dans une description technique étrangère à l'objet de cet ouvrage, le principe conceptuel d'une assistance ancrée peut être résumé en trois étapes méthodologiques. Premièrement, la question posée par l'utilisateur est confrontée à deux corpus distincts et explicitement identifiés : les données réelles du projet en cours (résultats de sondage, essais de laboratoire, modèle géostatistique) et un corpus documentaire normatif (textes réglementaires, normes d'essai, ouvrages de référence). Deuxièmement, seuls les éléments effectivement retrouvés dans ces deux corpus sont mobilisés pour construire la réponse, à l'exclusion de toute connaissance générale non vérifiable pour le cas d'espèce. Troisièmement, la réponse produite doit, par construction, demeurer traçable à ses sources de sorte que l'ingénieur puisse vérifier, élément par élément, l'origine de chaque affirmation avancée. Cette architecture, qui peut sembler relever de la seule discipline informatique, constitue en réalité une exigence méthodologique transposée du monde de l'ingénierie elle-même : elle reproduit, pour un système algorithmique, l'exigence de traçabilité déjà posée pour la donnée géotechnique au Chapitre 2.

22.5 Cas d'usage représentatifs

- **Relecture croisée d'un rapport** confrontation automatique des recommandations d'un rapport en cours de rédaction avec les exigences du référentiel normatif applicable (Annexe B), signalant les écarts ou omissions avant validation finale ;
- **Détection d'incohérences entre essais** mise en relation, pour un sondage donné, des résultats de plusieurs essais de laboratoire (Partie IV) afin de signaler une incohérence apparente par exemple un indice de plasticité élevé associé à un essai de gonflement libre signalant pourtant un potentiel faible, situation qui appelle une vérification plutôt qu'une validation automatique ;
- **Aide à la rédaction de synthèses** rédaction d'une première version de synthèse interprétative à partir des données du projet, systématiquement soumise à relecture et validation par l'ingénieur responsable avant intégration au rapport final (Chapitre 21) ;
- **Recherche documentaire normative** extraction rapide, au sein d'un corpus normatif volumineux, du passage exact applicable à une situation donnée, avec

référence précise à la norme et à l'article concernés plutôt qu'une paraphrase non vérifiable.

22.6 Filiation avec les systèmes experts et apport spécifique

L'idée d'assister la décision géotechnique par un système informatique n'est pas nouvelle : les systèmes experts à base de règles, développés dès les années 1980 pour plusieurs disciplines de l'ingénierie, poursuivaient déjà cet objectif, en encodant manuellement des règles de décision dérivées de l'expertise humaine. Leur limite principale résidait dans la rigidité de ces règles, incapables de traiter une situation non explicitement anticipée par leurs concepteurs. L'apport spécifique d'une assistance ancrée contemporaine réside dans sa capacité à traiter un langage naturel non structuré la question d'un ingénieur formulée librement tout en conservant, par l'ancrage méthodologique décrit au paragraphe 22.1, une discipline de fidélité aux sources comparable en rigueur à celle d'un système à base de règles, sans en partager la rigidité de couverture.

22.7 Limites persistantes et vigilance nécessaire

L'ancrage méthodologique réduit, mais n'élimine pas entièrement, le risque de production d'une réponse erronée par un système d'intelligence artificielle générative. Une synthèse de la littérature consacrée à l'évaluation pratique de ces systèmes souligne que la récupération documentaire, même bien conçue, ne garantit pas l'absence totale d'erreur factuelle dans la réponse générée, et recommande une évaluation systématique et continue de la fiabilité de ces systèmes plutôt qu'une confiance acquise une fois pour toutes après une phase de test initiale [\[20\]](#). Cette recommandation, formulée pour des contextes d'aide à la décision à fort enjeu, s'applique directement à la pratique géotechnique : la vigilance de l'ingénieur vis-à-vis des réponses produites ne doit jamais être suspendue, quelle que soit la qualité apparente de l'ancrage méthodologique mis en œuvre.

22.8 Responsabilité professionnelle et cadre déontologique

L'intégration d'une assistance algorithmique dans le flux de travail géotechnique ne modifie en rien le cadre de responsabilité professionnelle applicable à l'ingénieur signataire d'un rapport ou d'une note de calcul. Au même titre qu'un tableur de calcul ou qu'un logiciel d'éléments finis ne dégage pas son utilisateur de sa responsabilité sur le résultat produit, une synthèse générée avec assistance

algorithmique reste un projet de texte soumis à la même obligation de relecture critique, de vérification et d'appropriation par l'ingénieur que tout autre document technique engageant sa signature. La traçabilité méthodologique décrite au paragraphe 22.4 facilite cette vérification, mais ne s'y substitue pas.

22.9 Conditions d'une adoption raisonnée

L'introduction de cette assistance dans la pratique d'un bureau d'études gagne à suivre une progression maîtrisée plutôt qu'une adoption immédiate et généralisée : une première phase d'usage cantonnée aux tâches à faible enjeu (recherche documentaire, premier jet de synthèse systématiquement revu) permet de familiariser les équipes avec les forces et les limites réelles de l'outil avant toute extension à des usages plus engageants. Cette progression s'accompagne utilement d'une procédure interne explicite définissant les catégories de tâches pour lesquelles l'assistance est mobilisée, celles pour lesquelles elle est exclue, et les modalités de vérification systématique exigées dans chaque cas formalisation qui rejoint les bonnes pratiques de gouvernance recommandées pour le déploiement de systèmes d'aide à la décision dans tout contexte professionnel à enjeu de sécurité.

22.10 Perspectives

À mesure que le corpus normatif indexé s'enrichit et que la base de données projet accumule davantage de cas documentés (Chapitre 23), la pertinence de l'assistance ancrée devrait croître mécaniquement, sans modification de son principe méthodologique fondateur. Cette évolution incrémentale enrichir les sources mobilisées plutôt que relâcher l'exigence d'ancrage est la voie privilégiée par cet ouvrage pour que l'intelligence artificielle demeure, dans la pratique géotechnique régionale, un instrument de rigueur renforcée plutôt qu'un facteur de dilution de la responsabilité technique.

22.11 Exigences de mise à jour du corpus normatif

L'ancrage normatif décrit au paragraphe 22.4 n'est fiable qu'à la condition que le corpus documentaire mobilisé reste à jour des versions en vigueur des textes cités : une norme retirée ou révisée, si elle demeure indexée sans mention de son statut, peut conduire l'assistance à citer, en toute confiance apparente, une exigence obsolète. La maintenance de ce corpus vérification périodique des versions, retrait des textes annulés, ajout des nouvelles éditions constitue donc une tâche de

gouvernance documentaire à part entière, distincte de la seule mise en œuvre technique du système, et dont la responsabilité doit être explicitement attribuée au sein de l'organisation qui exploite l'assistance.

22.12 Exemple illustratif d'usage encadré

Considérons un ingénieur préparant la synthèse d'un rapport pour un site où les essais de laboratoire (Partie IV) révèlent un indice de plasticité élevé associé à un essai de gonflement libre signalant un potentiel modéré une combinaison qui n'est pas a priori incohérente (paragraphe 22.5), mais qui mérite d'être commentée. Une assistance correctement ancrée, interrogée sur cette situation, doit : premièrement, rapporter fidèlement les deux valeurs telles qu'enregistrées dans les données du projet, sans les corriger ni les réinterpréter ; deuxièmement, mentionner explicitement, si le corpus normatif indexé le permet, que l'amplitude du gonflement dépend de la minéralogie argileuse au-delà du seul indice de plasticité (Chapitre 13) ; troisièmement, recommander explicitement une vérification par l'ingénieur plutôt que trancher elle-même l'interprétation. C'est cette troisième caractéristique la capacité à recommander la vérification humaine plutôt qu'à affirmer une conclusion non vérifiable qui distingue un outil d'assistance correctement conçu d'un simple générateur de texte plausible.

22.13 Capitalisation des documents existants

Un grand nombre de bureaux d'études et de laboratoires de la sous-région disposent d'archives substantielles de rapports antérieurs, de notes manuscrites et de tableurs accumulés sur plusieurs décennies de pratique, rarement structurés sous une forme directement exploitable par les méthodes géostatistiques exposées dans cet ouvrage. Une assistance algorithmique capable de lire ces documents hétérogènes rapports PDF, notes scannées, tableurs anciens pour en extraire les données de sondage et les restructurer selon les principes de standardisation du Chapitre 2 représente un usage à forte valeur ajoutée, distinct de la seule assistance interprétative décrite aux paragraphes précédents : il s'agit ici de capitaliser une connaissance existante mais dormante, plutôt que de produire une interprétation nouvelle. Cet usage demeure soumis à la même exigence de vérification humaine : l'extraction automatisée d'une donnée ancienne doit être confrontée au document source avant toute intégration dans un nouveau modèle géostatistique.

22.14 Coût, accessibilité et équité d'accès

L'argument économique en faveur de l'assistance algorithmique ancrée rejoint directement la problématique d'accessibilité posée au Chapitre 1 : un outil d'aide à l'interprétation correctement conçu peut réduire le temps d'ingénieur nécessaire à la rédaction d'une première synthèse ou à la recherche documentaire normative, libérant un temps d'expertise précieux pour les tâches qui exigent un jugement humain irremplaçable l'interprétation finale, la décision de dimensionnement, la relation avec le maître d'ouvrage. Pour les bureaux d'études de taille modeste de la sous-région, souvent contraints en effectifs d'ingénieurs seniors, ce gain de temps représente un facteur d'accessibilité à une pratique rigoureuse comparable à celle de structures mieux dotées, à condition que l'outil reste un amplificateur de la compétence existante et non un substitut à sa constitution initiale chez les jeunes ingénieurs.

22.15 Formation des jeunes ingénieurs à un usage critique

L'introduction de cette assistance dans la pratique professionnelle pose une question pédagogique spécifique pour la formation des futurs ingénieurs géotechniciens (public visé par cet ouvrage, cf. Préface) : un usage précoce et non critique de l'assistance algorithmique, avant l'acquisition d'une maîtrise personnelle des méthodes exposées dans les parties précédentes, risquerait de produire des ingénieurs capables d'obtenir une réponse sans être capables d'en évaluer la pertinence l'inverse de l'objectif poursuivi. La recommandation de cet ouvrage est sans ambiguïté : l'apprentissage des fondements géostatistiques, pressiométriques et normatifs (Parties II à V) doit précéder, et non suivre, l'introduction de toute assistance algorithmique dans la pratique de l'étudiant ingénieur seule cette antériorité garantit la capacité de vérification critique exigée au paragraphe 22.3.

22.16 Multimodalité et documents hétérogènes

Au-delà du texte, un projet géotechnique mobilise fréquemment des documents de nature visuelle photographies de carottes de sondage, planches graphiques de courbes pressiométriques ou œdométriques, scans de rapports anciens. La capacité d'une assistance algorithmique à traiter conjointement ces différents supports, sous réserve du même principe d'ancrage développé au paragraphe 22.4, élargit le périmètre des tâches susceptibles d'être assistées : par exemple, la lecture assistée d'une photographie de carotte pour proposer une première description de faciès,

systématiquement soumise à validation par l'ingénieur ayant examiné l'échantillon physique, qui demeure seul juge de l'observation directe.

22.17 Indicateurs de suivi de la qualité de l'assistance

- **Taux de déclaration d'incertitude** proportion des réponses pour lesquelles le système signale explicitement l'absence d'information plutôt que de répondre par défaut ;
- **Taux de fidélité aux sources** proportion des affirmations factuelles d'une réponse effectivement vérifiées par recoupement avec la source citée, mesurée par échantillonnage périodique plutôt que de façon exhaustive ;
- **Taux de correction par l'ingénieur** fraction des synthèses générées ayant fait l'objet d'une modification substantielle par l'ingénieur avant intégration au rapport final, indicateur indirect de la pertinence réelle de la première proposition.

Le suivi régulier de ces indicateurs, à l'échelle d'un bureau d'études ou d'un laboratoire, permet de objectiver la confiance accordée à l'outil dans le temps, plutôt que de la fonder sur une impression initiale qui peut évoluer, dans un sens comme dans l'autre, à mesure que le corpus mobilisé s'enrichit (paragraphe 22.10) ou que les pratiques de vérification se relâchent par excès de confiance acquise.

22.18 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a posé un principe directeur l'ancrage méthodologique et l'a décliné en cas d'usage concrets, limites persistantes, exigences de gouvernance et conditions d'adoption raisonnée. Le fil conducteur qui les relie est unique : une assistance algorithmique n'a de valeur, en contexte d'ingénierie géotechnique, que dans la mesure où elle reste vérifiable, traçable et subordonnée au jugement professionnel qualifié exactement les mêmes exigences que celles posées, dans cet ouvrage, pour toute donnée géotechnique (Chapitre 2) et tout modèle géostatistique (Chapitre 6). L'intelligence artificielle, abordée sous cet angle, ne constitue pas une rupture méthodologique par rapport au reste de cet ouvrage, mais son extension cohérente à un nouvel instrument de travail.

22.19 Articulation avec l'enseignement de la géotechnique

Pour les établissements d'enseignement supérieur formant les futurs ingénieurs géotechniciens de la sous-région (public visé par cet ouvrage), l'enjeu pédagogique

soulevé par ce chapitre dépasse la seule question de l'outil : il invite à repenser la place de la mémorisation procédurale dans la formation, à mesure qu'une assistance documentaire devient capable de restituer rapidement une procédure normative. La valeur pédagogique irréductible demeure ailleurs : dans la capacité à juger de la pertinence d'une méthode pour un contexte donné, à interpréter un résultat au regard d'un jugement géotechnique d'ensemble, et à détecter une incohérence que l'application mécanique d'une procédure ne révélerait pas exactement les compétences que les Parties II à VI de cet ouvrage cherchent à transmettre par la compréhension des principes plutôt que par la seule application de recettes.

22.20 Une discipline en construction

L'usage de l'intelligence artificielle générative en ingénierie demeure, à l'heure de la rédaction de cet ouvrage, une pratique récente et en évolution rapide, pour laquelle les normes professionnelles et les cadres déontologiques sectoriels contrairement aux normes d'essai et de calcul détaillées dans les autres parties de cet ouvrage ne sont pas encore stabilisés. Ce chapitre doit donc être lu comme l'exposé de principes directeurs robustes (ancrage, traçabilité, responsabilité professionnelle inchangée) plutôt que comme un état figé d'une pratique : les modalités précises de mise en œuvre continueront vraisemblablement d'évoluer, sans que ces principes directeurs n'aient vocation à être remis en cause par cette évolution.

22.21 Articulation avec le reste de l'ouvrage

L'assistance ancrée décrite dans ce chapitre n'a de pertinence que parce qu'elle s'appuie sur les fondations méthodologiques exposées dans les parties précédentes : sans donnée standardisée et tracée (Chapitre 2), sans modèle géostatistique validé (Chapitre 6), sans corpus normatif structuré (Annexe B), il n'existe simplement aucune matière fiable sur laquelle ancrer une réponse. Ce constat referme la boucle de cet ouvrage sur lui-même : l'intelligence artificielle n'est pas un raccourci qui dispenserait de la rigueur méthodologique exposée dans les Parties I à VI elle en est, au contraire, l'un des bénéficiaires les plus directs.

22.22 Tableau récapitulatif des bonnes pratiques

Principe	Question à se poser avant usage
Ancrage	La réponse est-elle traçable à une donnée projet ou une source normative identifiée ?
Déclaration d'incertitude	Le système signale-t-il explicitement les cas d'absence d'information ?
Vérification humaine	Une relecture critique par un ingénieur qualifié est-elle systématique avant usage ?
Mise à jour documentaire	Le corpus normatif mobilisé est-il à jour des versions en vigueur ?
Responsabilité	La signature finale du document reste-t-elle attribuée à un ingénieur identifié ?

Ce tableau, conçu comme un aide-mémoire opérationnel plutôt que comme un résumé supplémentaire, peut utilement accompagner l'introduction de toute assistance algorithmique dans la pratique d'un bureau d'études ou d'un laboratoire, en complément des indicateurs de suivi détaillés au paragraphe 22.17.

22.23 Mot de transition vers la normalisation régionale

Les six parties précédentes de cet ouvrage ont exposé, chapitre après chapitre, les fondements théoriques et normatifs de la chaîne géotechnique numérique. Le Chapitre 23 qui suit referme l'ouvrage sur la question de la généralisation régionale de cette démarche et de sa contribution à la construction d'un référentiel géotechnique propre à la sous-région.

22.24 Glossaire spécifique au chapitre

- **Ancrage (grounding)** discipline imposant à un système d'assistance de distinguer données projet, corpus normatif et connaissance générale non vérifiée (paragraphe 22.1).
- **Génération augmentée par récupération** architecture combinant la recherche documentaire ciblée et la génération de texte, mobilisée pour construire une réponse traçable à ses sources (paragraphe 22.4).
- **Hallucination** production par un système d'assistance d'une affirmation non fondée sur une source vérifiable, risque que l'ancrage méthodologique réduit sans l'éliminer totalement (paragraphe 22.7).

- **Corpus documentaire indexé** ensemble des documents normatifs et de référence mobilisables par l'assistance, dont la mise à jour conditionne la fiabilité des réponses produites (paragraphe 22.11).

Ce glossaire spécifique complète le glossaire général de l'Annexe A pour les termes propres à l'usage de l'intelligence artificielle en contexte géotechnique, domaine dont le vocabulaire reste, comme souligné au paragraphe 22.20, encore en cours de stabilisation dans la pratique professionnelle.

22.25 Conclusion de la partie

Ce chapitre unique, qui constitue à lui seul la Partie VII de cet ouvrage, a délibérément reçu un traitement approfondi à la mesure de l'attention croissante et parfois disproportionnée que suscite aujourd'hui l'intelligence artificielle dans la plupart des secteurs professionnels. L'enseignement central qui s'en dégage est volontairement modeste : appliquée à la géotechnique, cette technologie n'a de valeur que subordonnée à la rigueur méthodologique exposée dans les six parties qui précèdent, et n'en dispense en aucune façon l'ingénieur qui l'utilise. C'est cette subordination assumée, plutôt qu'une promesse de transformation radicale de la pratique, qui constitue la position de cet ouvrage sur la question.

22.26 Pour aller plus loin

Le lecteur souhaitant approfondir les questions méthodologiques générales soulevées par l'évaluation et la fiabilisation des systèmes d'intelligence artificielle générative en contexte professionnel à enjeu au-delà du périmètre spécifiquement géotechnique de ce chapitre pourra utilement se référer à la littérature scientifique consacrée à l'évaluation pratique de ces systèmes, dont les enseignements généraux sur l'ancrage et la vérification (paragraphe 22.7) demeurent transposables, mutatis mutandis, à de nombreux autres domaines d'ingénierie au-delà de la géotechnique.

[\[20\]](#)

22.27 Récapitulatif des paragraphes du chapitre

Pour faciliter la navigation dans ce chapitre dense, ses vingt-sept paragraphes peuvent être regroupés en cinq blocs thématiques : le cadre conceptuel de l'ancrage (22.1 à 22.4) ; les cas d'usage et leur comparaison aux approches antérieures (22.5 à 22.6, 22.13) ; les limites, risques et exigences de gouvernance (22.7 à 22.11, 22.17, 22.20) ; les conditions d'adoption professionnelle et pédagogique (22.8, 22.9, 22.14

à 22.16, 22.19) ; et la synthèse opérationnelle de clôture (22.12, 22.18, 22.21 à 22.26). Cette structuration thématique, qui complète la numérotation séquentielle, permet au lecteur de revenir directement au bloc correspondant à sa préoccupation immédiate sans relire l'intégralité du chapitre.

PARTIE VIII : Vers une normalisation régionale

Implications pour la pratique géotechnique en zone UEMOA

23.1 L'absence actuelle de référentiel régional

Contrairement aux contextes nord-américain et européen, où des référentiels établis fixent des densités minimales de sondages par type d'ouvrage et de sol, aucun cadre équivalent n'existe à ce jour pour les organismes de normalisation de l'espace UEMOA. Cette absence laisse la décision d'investigation à la seule appréciation individuelle du bureau d'études une situation que ce chapitre soutient comme transitoire et appelée à évoluer.

23.2 De l'accumulation de validations à la norme

L'accumulation systématique de résultats de validation croisée (Chapitre 6) et de cartes de variance (Chapitre 4) sur un nombre croissant de projets, diversifiés par contexte géologique, constitue une base scientifique progressive pour établir, par type de sol et d'ouvrage, la densité de sondages nécessaire pour atteindre un niveau de fiabilité donné. Cette démarche inductive partant de l'observation répétée plutôt que d'une norme importée et non calibrée localement répond directement à la deuxième lacune structurelle identifiée au Chapitre 1.

23.3 Une contribution disponible aux institutions régionales

Cette base de connaissance, à mesure de sa constitution, est appelée à constituer une contribution directement disponible aux travaux des agences de normalisation et des laboratoires nationaux de référence de la sous-région, qui ne disposent aujourd'hui d'aucune donnée régionale consolidée pour établir de tels référentiels une voie concrète vers la sécurisation durable des ouvrages de construction en Afrique de l'Ouest.

23.4 Précédents internationaux de construction de référentiels

La construction de référentiels quantitatifs de densité d'investigation n'est pas un exercice inédit : plusieurs administrations routières nord-américaines ont développé, sur plusieurs décennies, des grilles de densité de sondages spécifiques à

leur géologie régionale, dérivées de l'observation cumulée d'un grand nombre de projets plutôt que d'une dérivation théorique unique. De façon comparable, le processus d'élaboration des annexes nationales de l'Eurocode 7 par lequel chaque État membre européen calibre les coefficients et pratiques du texte européen sur son propre retour d'expérience géotechnique illustre qu'un cadre normatif international robuste (Chapitre 14) n'exclut pas, mais appelle au contraire, une calibration quantitative régionale construite progressivement. La démarche proposée pour l'espace UEMOA s'inscrit dans cette même logique, transposée à un contexte où cette calibration reste, aujourd'hui, à entreprendre.

23.5 Une méthodologie de constitution progressive

- **Capitalisation native** chaque projet conduit selon la méthodologie de cet ouvrage produit nativement les métriques nécessaires (résultats de validation croisée, cartes de variance) sans effort de collecte supplémentaire dédié ;
- **Classification géologique partagée** les sites traités sont classés selon une typologie géologique partagée (formations latéritiques, argileuses/sédimentaires, côtières carbonatées, et, à terme, d'autres contextes rencontrés dans la sous-région), condition de la comparabilité des résultats entre projets ;
- **Agrégation incrémentale** l'agrégation progressive des résultats, par contexte géologique et par type d'ouvrage, permet de faire émerger des plages de densité de sondages associées à un niveau de fiabilité donné, sans attendre la complétude d'un recensement exhaustif avant toute publication intermédiaire ;
- **Acquisition volontaire par la recherche** les laboratoires de recherche, institutions académiques et agences de normalisation peuvent acquérir les résultats agrégés auprès des entités consentantes, selon des conditions librement négociées, sous une forme synthétique distincte des données brutes de chaque projet, dans le respect de la souveraineté de chaque entité sur ses données (§ 2.7).

23.6 Acteurs et gouvernance d'une telle démarche

La construction d'un référentiel régional crédible ne peut reposer sur un acteur unique : elle suppose la participation coordonnée des bureaux d'études produisant la donnée de terrain, des laboratoires nationaux de référence (à l'image du Laboratoire National de Référence LNR-BTP au Sénégal) capitalisant et validant les

résultats à l'échelle nationale, des établissements d'enseignement supérieur et de recherche assurant la rigueur scientifique de l'agrégation, et, in fine, des organismes de normalisation compétents à l'échelle de l'UEMOA pour la publication d'un référentiel opposable. Aucun de ces acteurs ne peut, isolément, produire un référentiel légitime et représentatif de la diversité géologique régionale.

23.7 Risques d'une normalisation prématurée

Point de vigilance

Publier un référentiel de densité de sondages avant que la base d'observations agrégées n'atteigne une taille et une diversité géologique suffisantes reproduirait, à l'échelle régionale, l'écueil dénoncé au Chapitre 1 : une norme non calibrée sur le contexte réel, simplement transposée hâtivement par analogie. La rigueur scientifique de la démarche inductive proposée ici réside précisément dans le refus de cette précipitation.

23.8 Le rôle de chaque bureau d'études dans la démarche

Au niveau individuel, chaque bureau d'études adoptant la méthodologie décrite dans cet ouvrage dispose, par construction, d'un patrimoine de données structuré et capitalisable pour ses propres besoins et, le cas échéant, cessible à des laboratoires de recherche dans les conditions décrites au paragraphe 23.5 : la simple application rigoureuse de la validation croisée (Chapitre 6) sur chacun de ses projets, et la documentation systématique du contexte géologique rencontré (Chapitre 2), constituent un actif technique que l'entreprise peut valoriser en interne et, si elle y consent, proposer à l'acquisition par des laboratoires de recherche. La normalisation régionale n'est donc pas un projet distinct de la pratique quotidienne de l'ingénierie géotechnique : elle en est l'extension naturelle, à condition que cette pratique quotidienne adopte la rigueur méthodologique exposée dans les parties précédentes de cet ouvrage.

23.9 Vers une feuille de route

Trois étapes paraissent raisonnables pour engager cette démarche : premièrement, l'adoption progressive, par un nombre croissant de bureaux d'études et de laboratoires de la sous-région, d'une méthodologie de validation systématique de leurs modèles géotechniques, condition préalable à toute agrégation ultérieure ; deuxièmement, la constitution, à l'initiative d'un laboratoire national de référence ou d'une institution académique, d'une base de capitalisation des résultats agrégés

par contexte géologique ; troisièmement, et seulement lorsque cette base atteint une représentativité suffisante, l'élaboration par les organismes de normalisation compétents d'un premier référentiel quantitatif, conçu comme une première édition appelée à être révisée à mesure que la base de connaissance s'enrichit plutôt que comme un texte figé. C'est dans cet esprit, modeste sur le plan de l'ambition immédiate mais rigoureux sur le plan de la méthode, que le présent ouvrage entend contribuer à la sécurisation durable des ouvrages de construction en Afrique de l'Ouest.

23.10 Indicateurs candidats pour un référentiel régional

Indicateur	Origine méthodologique	Usage normatif envisagé
Densité de sondages / surface	Validation LOO agrégée (Ch. 6)	Seuil minimal par type de sol et d'ouvrage
RMSE de contact géologique	Validation LOO (Ch. 6)	Niveau de fiabilité attendu par contexte
Variance résiduelle moyenne	Krigeage d'indicatrice (Ch. 4)	Critère d'arrêt d'investigation
Portée de variogramme typique	Ajustement variographique (Ch. 3)	Espacement de sondage recommandé
Plage de PI*/EM par lithologie	Interpolation mécanique (Ch. 8)	Référence régionale par faciès

Ce tableau n'a pas vocation à constituer, en l'état, un référentiel opposable : il illustre la nature des indicateurs que la démarche méthodologique de cet ouvrage produit nativement, et qui pourraient, une fois agrégés sur un nombre suffisant de projets selon le processus décrit au paragraphe 23.5, constituer la matière première d'un futur référentiel régional.

23.11 Portée pédagogique de la démarche

Au-delà de sa portée normative à long terme, la démarche décrite dans ce chapitre a une vocation pédagogique immédiate : elle offre aux étudiants ingénieurs et aux doctorants de la sous-région un objet de recherche concret et structurant la constitution, l'analyse et l'exploitation d'une base de données géotechnique régionale directement articulé aux méthodes exposées dans les parties précédentes de cet ouvrage. Plusieurs des questions soulevées (calibration des coefficients partiels propres à un contexte géologique régional, identification des facteurs

explicatifs de la variabilité des sols résiduels tropicaux, optimisation de la densité d'investigation par type d'ouvrage) constituent autant de sujets de mémoire d'ingénieur ou de thèse dont la réalisation contribuerait directement à la feuille de route esquissée au paragraphe 23.9.

23.12 Comparaison avec d'autres filières d'infrastructure normalisée

D'autres filières techniques de la sous-région ont emprunté un chemin comparable à celui esquissé dans ce chapitre : la normalisation du béton armé en zone tropicale, par exemple, s'est progressivement affranchie d'une application non critique des règles européennes pour intégrer des considérations propres au climat et aux matériaux locaux, à mesure que l'expérience régionale accumulée le justifiait. Cette trajectoire adoption initiale d'un cadre international robuste, puis calibration progressive sur l'expérience locale confirme que la démarche proposée pour la normalisation de la densité d'investigation géotechnique n'est pas une voie isolée, mais s'inscrit dans une dynamique plus large de maturation technique du secteur de la construction en Afrique de l'Ouest.

23.13 Articulation avec les organismes existants

L'espace UEMOA dispose déjà d'institutions dont les missions recoupent directement celles évoquées dans ce chapitre : laboratoires nationaux de référence du bâtiment et des travaux publics, ordres et associations professionnelles d'ingénieurs, structures universitaires de recherche en génie civil. La démarche proposée ne suggère la création d'aucune structure nouvelle : elle appelle, plus modestement, à ce que ces institutions existantes intègrent, dans leurs missions courantes, la collecte et l'agrégation des indicateurs décrits au paragraphe 23.10, dans le prolongement naturel de leurs attributions actuelles plutôt qu'en marge de celles-ci.

23.14 Un appel à la collaboration scientifique

Cet ouvrage, conçu comme un document de référence académique et professionnel plutôt que comme un texte clos, s'adresse en définitive à chaque lecteur étudiant, enseignant-chercheur, ingénieur de bureau d'études, responsable de laboratoire comme une invitation à la collaboration scientifique plutôt qu'à la seule application. La normalisation régionale décrite dans ce chapitre ne se décrète pas : elle se construit, projet après projet, par l'application rigoureuse et partagée des méthodes

exposées dans les parties précédentes de cet ouvrage. C'est à cette construction collective, patiente et cumulative, que ce chapitre, et plus largement cet ouvrage, entendent contribuer.

23.15 Indicateurs de suivi de la démarche elle-même

Au-delà des indicateurs géotechniques proprement dits (paragraphe 23.10), le suivi de la démarche de normalisation elle-même gagnerait à s'appuyer sur des indicateurs de second niveau : nombre de sites caractérisés selon la méthodologie de cet ouvrage et intégrés à la base de capitalisation régionale, diversité des contextes géologiques effectivement couverts au regard des contextes géologiques de la sous-région, et nombre de bureaux d'études et de laboratoires effectivement engagés dans la démarche. Le suivi explicite de ces indicateurs de progression, distinct des indicateurs géotechniques eux-mêmes, permettrait aux institutions porteuses de la démarche (paragraphe 23.13) d'évaluer objectivement sa maturité avant d'envisager la publication d'un premier référentiel.

23.16 Anticiper la révision périodique du référentiel

Un référentiel régional, une fois publié, ne saurait demeurer figé sans reproduire, à terme, le défaut même qu'il visait à corriger : l'application d'une règle non recalibrée sur l'expérience réelle. La planification, dès l'origine de la démarche, d'un cycle de révision périodique par exemple quinquennal, à l'image des cycles de révision des Eurocodes eux-mêmes (Chapitre 14) intégrant les données accumulées depuis la précédente édition, garantirait que ce référentiel demeure un document vivant, fidèle à l'esprit inductif et cumulatif qui a guidé sa construction initiale plutôt qu'un texte qui se fige dès sa première publication.

23.17 Mot de conclusion de la partie

La trajectoire esquissée dans ce chapitre de la donnée individuelle rigoureusement collectée (Chapitre 2) à la norme régionale validée par l'expérience cumulée referme la boucle ouverte au Chapitre 1 de cet ouvrage. Entre ces deux extrémités se déploie l'ensemble des méthodes exposées dans les parties précédentes : géostatistique, essais pressiométriques et de laboratoire, dimensionnement normatif, restitution professionnelle et assistance algorithmique ancrée. C'est la cohérence de cette chaîne complète, plus que la sophistication de chacun de ses

maillons pris isolément, qui constitue l'apport durable que cet ouvrage entend offrir à la pratique géotechnique de l'Afrique de l'Ouest.

23.18 Le coût de la non-donnée

Symétriquement à l'analyse du coût de l'inaction présentée au Chapitre 1, il convient de souligner le coût spécifique de l'absence de capitalisation de la donnée : chaque sondage exécuté sans être correctement géoréférencé, standardisé et archivé (Chapitre 2) représente un investissement consenti dont le bénéfice de long terme la contribution potentielle à la connaissance régionale décrite dans ce chapitre est purement et simplement perdu. Ce coût, invisible au moment de la décision individuelle de chaque projet, se révèle collectivement considérable à l'échelle de plusieurs décennies de pratique régionale : on estime aisément que des milliers de sondages ont été exécutés dans la sous-région sans laisser de trace exploitable au-delà du projet qui les a commandités, un patrimoine de connaissance potentiel qui reste à reconstituer faute d'avoir été capté en temps utile.

23.19 Rôle des revues et conférences régionales

La diffusion des résultats de validation et des enseignements méthodologiques tirés de projets individuels gagnerait à s'appuyer sur les canaux de publication scientifique et professionnelle déjà existants dans la sous-région conférences techniques du secteur du BTP, revues universitaires de génie civil, journées d'études organisées par les ordres professionnels plutôt que d'attendre la constitution d'un canal dédié avant toute publication. La présentation de cas d'étude individuels, structurée de façon systématique (contexte géologique, programme d'investigation, application méthodologique, enseignements), constitue une contribution accessible à tout ingénieur ou chercheur souhaitant participer à cette capitalisation collective sans attendre la mise en place d'une infrastructure de centralisation plus ambitieuse.

23.20 Mot final

Le Sénégal et l'espace UEMOA disposent d'atouts réels pour conduire cette démarche à son terme : un tissu de bureaux d'études et de laboratoires en développement actif, des établissements d'enseignement supérieur engagés dans la formation d'ingénieurs géotechniciens de qualité, et une prise de conscience publique croissante de l'enjeu de sécurité des constructions (Chapitre 1). Ce qui reste à

construire n'est pas la compétence individuelle déjà présente mais la coordination méthodologique qui transforme des compétences individuelles dispersées en une connaissance collective cumulative. C'est à cette transformation que le présent ouvrage, dans son ensemble, entend apporter sa contribution.

23.21 Calendrier indicatif

Horizon	Jalon	Acteurs principaux
1-2 ans	Adoption de la méthodologie par un premier réseau de bureaux d'études et laboratoires	Bureaux d'études, LNR-BTP
2-4 ans	Constitution d'une première base de capitalisation par contexte géologique	Laboratoires nationaux, universités
4-7 ans	Publication d'un premier référentiel indicatif de densité d'investigation	Organismes de normalisation UEMOA
7+ ans	Premier cycle de révision du référentiel sur expérience élargie	Ensemble des acteurs

Ce calendrier, délibérément indicatif et non prescriptif, traduit l'horizon de temps réaliste d'une démarche inductive telle que celle proposée dans ce chapitre : la normalisation régionale de la densité d'investigation géotechnique ne se conçoit pas comme un projet de quelques mois, mais comme un engagement de moyen terme à la mesure de l'ambition scientifique et institutionnelle qu'elle porte.

23.22 Ce que cet ouvrage ne prétend pas accomplir seul

Il convient, en clôture de cette partie, de rappeler les limites de l'ambition portée par cet ouvrage : la méthodologie exposée dans les Parties I à VII fournit un cadre scientifique et opérationnel rigoureux, mais n'épuise pas, à elle seule, l'ensemble des conditions de la normalisation régionale esquissée dans ce chapitre qui suppose également une volonté institutionnelle, des ressources dédiées à la capitalisation des données, et une coordination entre acteurs aux intérêts parfois divergents. Cet ouvrage entend fournir la méthode ; sa mise en œuvre à l'échelle régionale relève d'un effort collectif qui dépasse le périmètre d'un seul document de référence, quelle que soit sa rigueur.

23.23 Articulation de ce chapitre avec les méthodes exposées

Les chapitres précédents de cet ouvrage géostatistique (Parties II et III), essais in situ et de laboratoire (Parties III et IV), dimensionnement normatif (Partie V),

restitution professionnelle (Partie VI) et assistance par IA (Partie VII) constituent les instruments opérationnels dont la mise en œuvre systématique et documentée alimentera, à terme, la base de capitalisation régionale décrite aux paragraphes 23.4 et suivants. Chaque ingénieur appliquant rigoureusement cette chaîne sur son propre projet contribue, par construction, à l'accumulation des validations qui fonderont le futur référentiel régional esquissé dans ce chapitre.

23.24 Remerciements et perspective d'édition future

Cette première édition du GeoSol Studio Reference Book reflète l'état des connaissances et des pratiques méthodologiques au moment de sa rédaction. Conformément à l'esprit de révision périodique défendu au paragraphe 23.16 pour le futur référentiel régional, les auteurs entendent appliquer le même principe à cet ouvrage lui-même : les retours d'expérience des lecteurs étudiants, enseignants-chercheurs, ingénieurs de bureaux d'études, responsables de laboratoires et l'accumulation de nouveaux cas d'étude documentés sont appelés à enrichir les futures éditions de cet ouvrage, dans la même logique cumulative et collaborative que celle défendue tout au long de cette partie.

23.25 Récapitulatif des chapitres de cet ouvrage

Partie	Chapitres	Question centrale traitée
I	1-2	Pourquoi et comment structurer l'investigation géotechnique
II	3-6	Comment modéliser le sous-sol de façon probabiliste et validée
III	7-8	Comment mesurer et interpoler le comportement mécanique in situ
IV	9-13	Comment caractériser le sol par les essais de laboratoire
V	14-17	Comment dimensionner les fondations selon l'Eurocode 7
VI	18-21	Comment restituer le modèle en livrables d'ingénierie
VII	22	Comment encadrer l'usage de l'IA en pratique géotechnique
VIII	23-25	Comment ces méthodes s'appliquent à trois contextes réels
IX	26	Comment construire une normalisation régionale durable

Ce tableau de synthèse, qui referme l'ouvrage, peut servir de guide de navigation rapide pour le lecteur souhaitant revenir, ultérieurement, à un chapitre précis selon la question méthodologique qu'il se pose dans sa pratique l'objectif premier, rappelé dès la préface, ayant toujours été de constituer un ouvrage de référence consultable par chapitre indépendant autant que lisible dans sa continuité d'ensemble.

23.26 Dernier mot

La géotechnique est, par nature, une discipline de l'incertain : le sous-sol ne se laisse jamais observer complètement, et toute décision d'ingénierie qui le concerne repose nécessairement sur une interpolation à partir d'un nombre fini d'observations. Le présent ouvrage n'a pas eu la prétention d'éliminer cette incertitude irréductible : il a cherché à la rendre mesurable, traçable et communicable, de la donnée individuelle (Chapitre 2) à la norme régionale (présent chapitre). C'est dans cette transformation de l'incertitude en grandeur gérée, plutôt que dans son élimination illusoire, que réside la contribution durable que cet ouvrage espère apporter à la sécurité des constructions en Afrique de l'Ouest.

23.27 Glossaire spécifique au chapitre

- **Référentiel régional** ensemble cohérent d'indicateurs quantitatifs (densité de sondages, métriques de validation) destinés à guider l'investigation géotechnique pour un type de sol et d'ouvrage donné (paragraphe 23.10).
- **Démarche inductive** démarche scientifique partant de l'observation répétée de cas particuliers pour en dégager une règle générale, opposée à l'application directe d'une norme importée non vérifiée (paragraphe 23.2).
- **Base de capitalisation** ensemble structuré des résultats de validation et de variance issus de projets multiples, organisé par contexte géologique (paragraphe 23.5).

Ce chapitre referme l'ouvrage sur l'idée que la rigueur individuelle de chaque projet, lorsqu'elle est systématiquement documentée et partagée selon les principes de cette partie, devient le matériau d'une connaissance collective dont la portée dépasse largement celle d'un seul projet pris isolément.

23.28 Conclusion générale de l'ouvrage

Ce chapitre referme l'ouvrage dans son ensemble. Les vingt-deux chapitres qui précèdent ont cherché à démontrer qu'une pratique géotechnique rigoureuse,

fondée sur la géostatistique, l'essai pressiométrique, les essais de laboratoire normalisés et le calcul réglementaire selon l'Eurocode 7, est non seulement souhaitable mais opérationnellement accessible aux bureaux d'études et laboratoires d'Afrique de l'Ouest dès aujourd'hui sans attendre la constitution préalable du référentiel régional dont ce chapitre esquisse la construction. Cette accessibilité immédiate de la méthode, indépendante de l'achèvement de la démarche collective de normalisation, est le message final que les auteurs souhaitent voir retenir de cet ouvrage : chaque ingénieur, dès son prochain projet, peut appliquer cette rigueur sans attendre que d'autres l'aient fait avant lui.

ANNEXES

Annexe A Fiche standardisée d'enregistrement de sondage géotechnique

Les gabarits suivants représentent les modèles standardisés GeoSol Studio utilisés pour la collecte, l'enregistrement et la restitution des données géotechniques. Chaque formulaire est aligné sur les exigences méthodologiques des chapitres correspondants de cet ouvrage.

A.1 Sondage : identification et localisation

The screenshot displays the GeoSol Studio application window. The title bar reads "Fichier Accueil Insertion Dessin Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide". The ribbon contains several groups of icons for formatting and data manipulation. Below the ribbon, a formula bar shows "C17" and a function icon. The main area is a spreadsheet with columns labeled A through J and rows numbered 1 through 25. The spreadsheet contains a header row with the following text: "SONDAGES CAROTTES | Zone : X | EPSG : 32628". Below this, a row of text defines variables: "x, y en coordonnées projetées (m) ou WGS84 (degrés -- conversion auto), z = altitude du terrain naturel (m NGM), nappe_profondeur_m = profondeur de la nappe / sol (m)". The table has the following columns: "code", "type_sondage", "date_sondage", "profondeur_totale_m", "x", "y", "z", "zone", "remarques", and "nappe_profondeur_m". The table is currently empty, with a green border around the cell at row 17, column C.

Figure A.1 Gabarit GeoSol Studio Fiche d'identification et de localisation du sondage

A.2 Sondage : description stratigraphique

Microsoft Excel interface showing the 'Strates' worksheet. The ribbon includes 'Fichier', 'Accueil', 'Insertion', 'Dessin', 'Mise en page', 'Formules', 'Données', 'Révision', 'Affichage', and 'Aide'. The 'Accueil' ribbon is active, showing options for 'Coller', 'Police', 'Alignement', 'Nombre', and 'Styles'.

The worksheet contains the following data:

	A	B	C	D	E	F
1	STRATES Zone : X					
2	Une ligne par couche. profondeur_a_m > profondeur_de_m. Profil cotier a 3 horizons (sable dunaire / argile sableuse / marne-calcaire).					
3	code	zone	profondeur_de_m	profondeur_a_m	lithologie	commentaires
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						

The bottom of the worksheet shows the 'Coordonnées' tab selected, with a '+' button to add more tabs.

Figure A.2 Gabarit GeoSol Studio Fiche de description stratigraphique

A.3 Essai pressiométrique Ménard fiche de coordonnées

[illegible]

Figure A.3 Gabarit GeoSol Studio Coordonnées de l'essai pressiométrique Ménard

A.4 Essai pressiométrique Ménard fiche de résultats

Fichier Accueil Insertion Dessin Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide

Calibri 11 A⁺ A⁻ G I S Police Alignement Standard Nombre Styles

K11 : X ✓ fx

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	MESURES SP Zone : X							
2	Pas de 1.0-1.5 m par défaut. EM et Pl* en MPa. alpha : 1 (argile molle), 0.67 (argile), 0.5 (limon/marne), 0.33 (sable), 0.25 (roche).							
3	code	zone	nature_sol	profondeur_de_m	profondeur_a_m	pl_star_mpa	em_mpa	alpha
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

< > Coordonnees Mesures Notice +

Figure A.4 Gabarit GeoSol Studio Résultats de l'essai pressiométrique Ménard

A.5 Essais de laboratoire limites d'Atterberg

1	LIMITES D'ATTERBERG Argile sableuse Zone : X						
2	wL = limite de liquidite (%) wP = limite de plasticite (%) IP = wL - wP profondeur_m : profondeur de prelevement (m/TN)						
3	sondage_code	zone	lithologie	profondeur_m (m)	wl_pct (%)	wp_pct (%)	ip_pct (%)
4	ST1		Argile sableuse	5			
5	ST2		Argile sableuse	5			
6	ST3		Argile sableuse	5			
7	ST4		Argile sableuse	5			
8	ST5		Argile sableuse	5			
9	ST6		Argile sableuse	5			
10	ST7		Argile sableuse	5			
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							

Figure A.5 Gabarit GeoSol Studio Limites d'Atterberg

A.6 Essais de laboratoire granulométrie

Fichier **Accueil** Insertion Dessin Mise en page Formules Données Révision Affichage A

Coller Presse-papiers Police Alignement Nombre

Calibri 11 A^ A^

G I S

Standard

09

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Zone :	X							
2	Lithologie :	Sable dunaire							
3	GRANULOMETRIE Sable dunaire Zone : X								
4	D (mm)	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	
5	5								
6	2								
7	1								
8	0,63								
9	0,4								
10	0,315								
11	0,2								
12	0,1								
13	0,08								
14	0,063								
15	0,04								
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									

Sable dunaire Argile sableuse Notice +

Figure A.6 Gabarit GeoSol Studio Granulométrie

A.7 Essai de cisaillement direct enveloppe de Mohr-Coulomb

Fichier

Accueil

Insertion

Dessin

Mise en page

Formules

Données

Révision

Affichage

Aide

Coller

Presse-papiers

Calibri

11

A⁺

A⁻

G

I

S

Police

Alignement

Standard

%

000

Nombre

Mise en forme cc

Mettre sous form

Styles de cellules

Styles

J9

</

Figure A.7 Gabarit GeoSol Studio Essai de cisaillement direct

A.8 Essai de gonflement libre fiche de résultats

Fichier

Accueil

Insertion

Dessin

Mise en page

Formules

Données

Révision

Affichage

Aide

Coller

Presse-papiers

Calibri

11

A⁺

A⁻

G

I

S

Police

Alignement

Standard

Nombre

Mise en forme conditionnelle

Mettre sous forme de tableau

Styles de cellules

Insérer

Supprimer

Format

Cellules

Trier et filtrer

Rechercher

filtre

sélect

Édition

F17

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ESSAI DE GONFLEMENT Argile sableuse Zone : X								
2	H0 = 20 mm constant Remplir Dh/H0 (%) pour chaque palier. Palier libre = pression de gonflement (sigma variable, Dh/H0 = 0).								
3				sigma = 1.0 kPa	sigma = 27.8 kPa	sigma = 55.5 kPa	sigma = 111.0 kPa	sigma palier libre (kPa)	Dh/H0 palier libre (%) = 0
4	sondage_code	zone	lithologie	Dh/H0 P1 (%)	Dh/H0 P2 (%)	Dh/H0 P3 (%)	Dh/H0 P4 (%)	sigma libre (kPa)	Dh/H0 P libre (%) = 0
5	ST1								
6	ST2								
7	ST3								
8	ST4								
9	ST5								
10	ST6								
11	ST7								
12									
13									

Figure A.8 Gabarit GeoSol Studio Gonflement libre et potentiel de gonflement

A.9 Essai œdométrique indices de compressibilité

Fichier Accueil Insertion Dessin Mise en page Formules Données Révision Affichage Aide

Calibri 11 A A

Coller Presse-papiers Police Alignement Nombre

Q21 : X ✓ fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zone :	X								
2	Lithologie :	Argile sableuse								
3	ESSAI OEDOMETRIQUE Argile sableuse Zone : Kayar									
4	sigma (kPa)	Phase	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	
5	5	charge								
6	27,75	charge								
7	55,5	charge								
8	111	charge								
9	277	charge								
10	555	charge								
11	1110	charge								
12	555	decharge								
13	111	decharge								
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										

Argile sableuse Marne-calcaire Notice +

Figure A.9 Gabarit GeoSol Studio Essai œdométrique et courbe de compressibilité

Annexe B GeoSol Studio : présentation des modules fonctionnels

Cette annexe illustre les principaux modules de GeoSol Studio à travers des captures réelles tirées d'un projet d'investigation conduit à Diourbel (Sénégal). Chaque figure renvoie au chapitre de cet ouvrage qui en décrit le fondement méthodologique. La séquence suit la chaîne complète : acquisition de données (§ 2) → modélisation géostatistique (§ 3–6) → calcul des paramètres mécaniques (§ 7–8) → dimensionnement des fondations (§ 15–17) → assistance par IA (§ 22).

B.1 Interface principale de GeoSol Studio

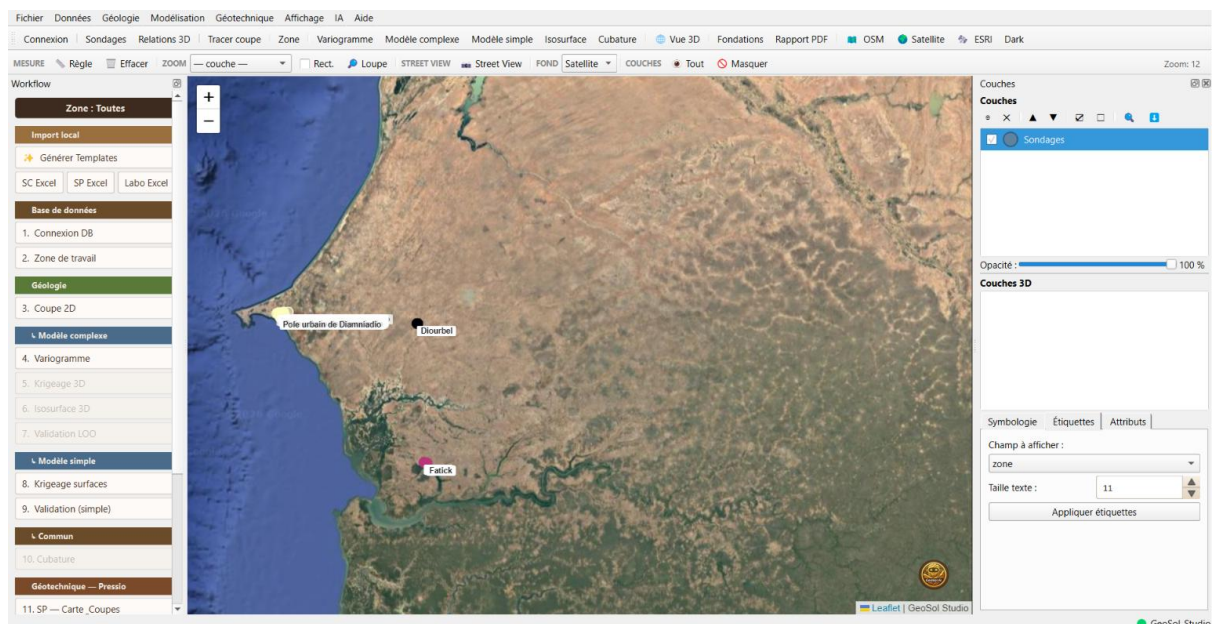


Figure B.1 Interface principale de GeoSol Studio. Vue cartographique SIG (fond satellite/OSM) avec localisation des sondages géoréférencés. La barre de menus donne accès aux modules : Isosurface, Cubature, Vue 3D, Fondations, Rapport PDF.

B.2 Définition interactive de l'axe de coupe géologique sur la carte

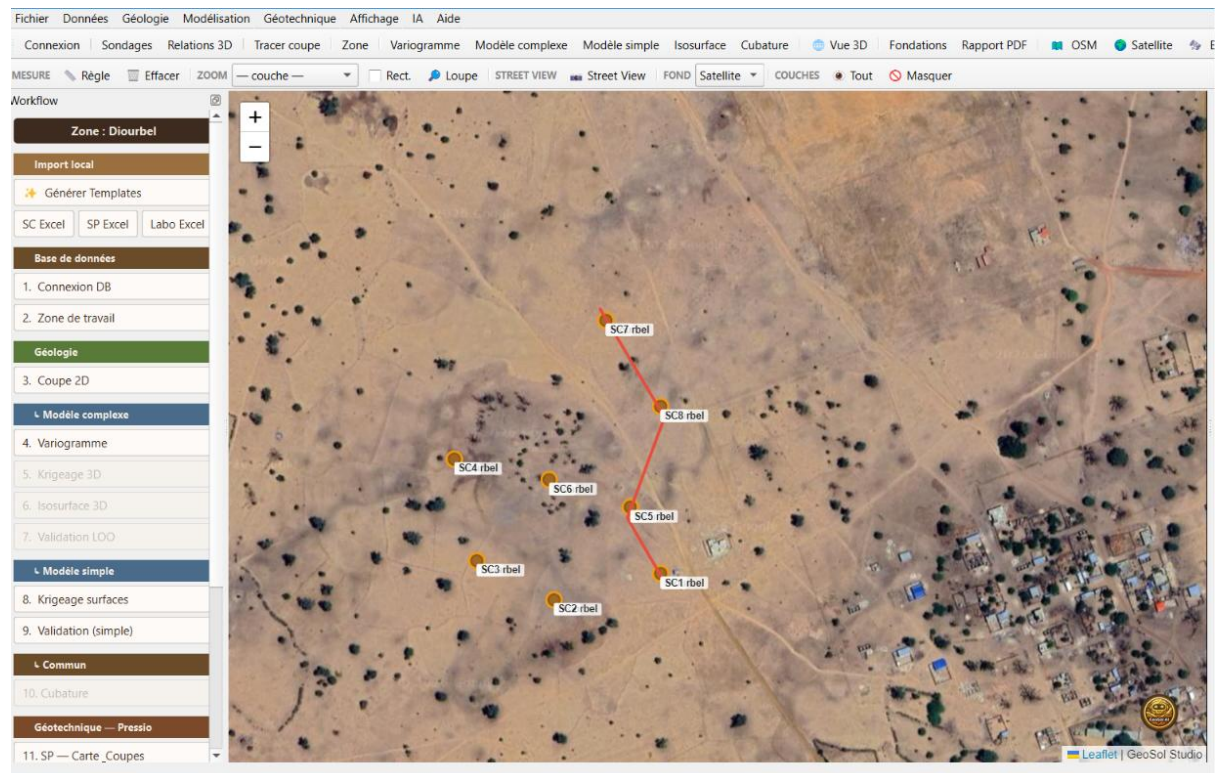


Figure B.2 Définition interactive de l'axe de coupe géologique sur la carte. Les sondages traversés sont automatiquement sélectionnés et ordonnés le long du profil.

B.3 Coupe géologique brute



Figure B.3 Coupe géologique brute : données de sondage reportées sans interpolation. Les contacts lithologiques sont marqués aux profondeurs mesurées et constituent la référence de plausibilité du modèle.

B.4 Coupe géologique interpolée par krigeage d'indicatrice

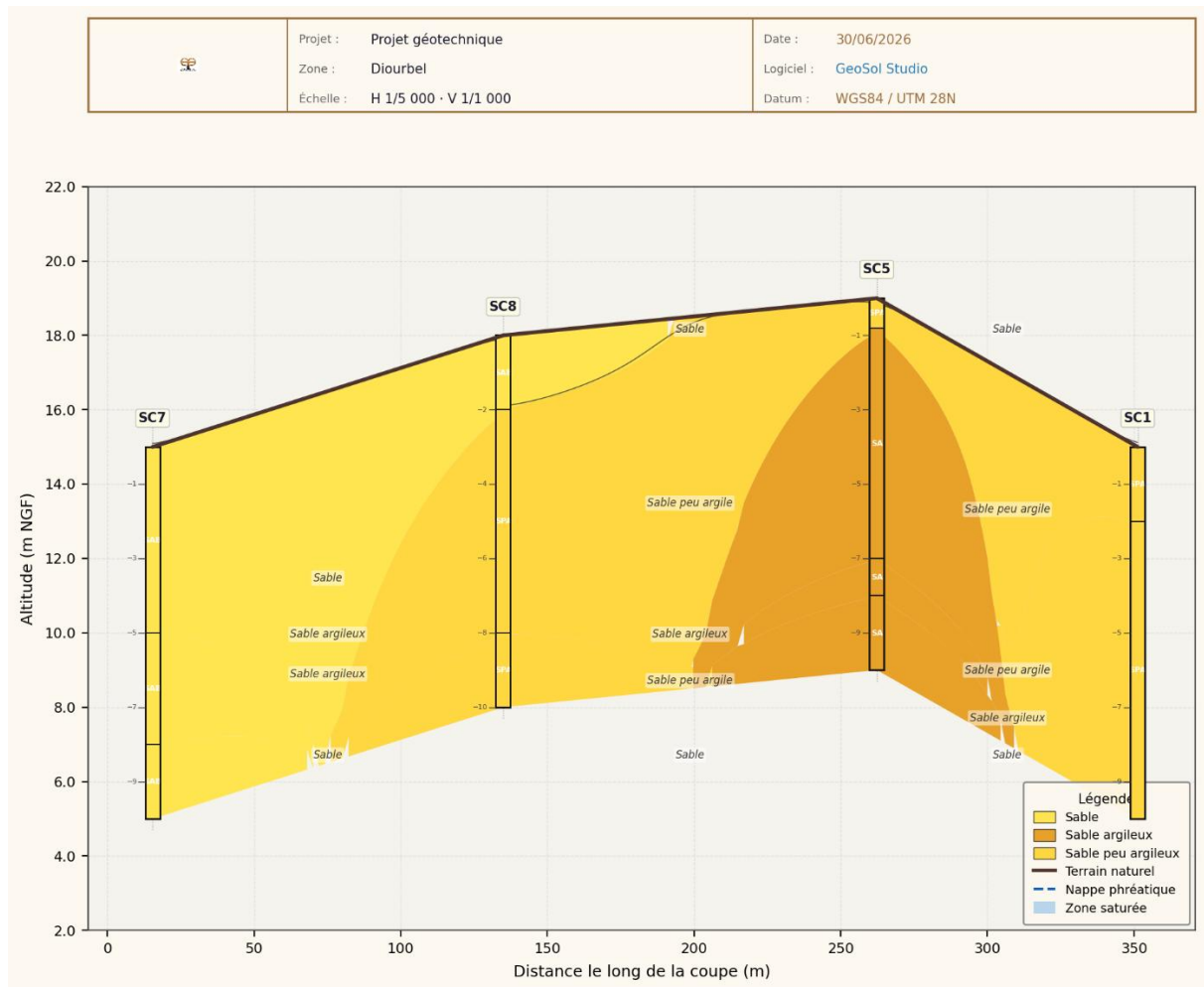


Figure B.4 Coupe géologique interpolée par krigeage d'indicatrice (Ch. 4). Les formations sont représentées en continu entre sondages ; les zones de transition expriment l'incertitude du modèle là où la densité d'investigation est plus faible.

B.5 Ajustement du variogramme expérimental

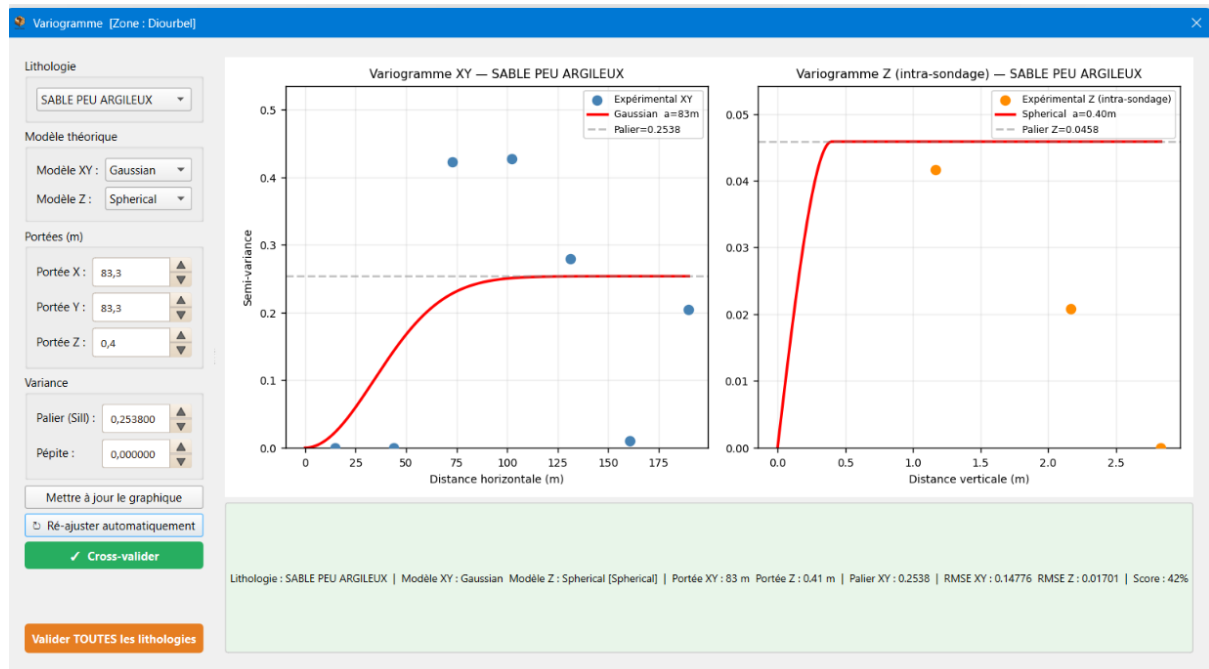


Figure B.5 Ajustement du variogramme expérimental (Ch. 3). Les points représentent les demi-variances par classe de distance ; la courbe est le modèle théorique ajusté (portée, palier, pépité) qui structure l'interpolation.

B.6 Paramètres du krigeage d'indicatrices

Krigeage 3D — Paramètres

Résolution de la grille

Résolution XY (horizontal) : 10,00 m

Résolution Z (vertical) : 1,00 m

Grille estimée : 35×43×11 = 16,555 cellules

Zone à kriger

☐ Dessiner un polygone sur la carte

Dessiner

Aucun polygone dessiné

☒ Couche du projet : Sondages

Cette couche ne contient pas de polygone — sélectionnez une couche de type Polygon/MultiPolygon.

☐ Rectangle automatique (bbox des données) — marge :

50,00 m

☐ Nappe phréatique (0 = absente / non mesurée)

Saisir la profondeur de la nappe depuis la surface (TN) en mètres.
0 = nappe absente ou non rencontrée.

	Sondage	TN (m NGF)	Prof. nappe (m)
1	SC1	15.00	0.00
2	SC2	16.00	0.00
3	SC3	17.00	0.00

Tout = 0 (sec)

Uniforme : 1,0 m

Appliquer

Épaisseur nappe (3D) : 5,0 m

OK

Cancel

Figure B.6 Paramètres du krigeage.

B.7 Validation croisée Leave-One-Out (LOO)

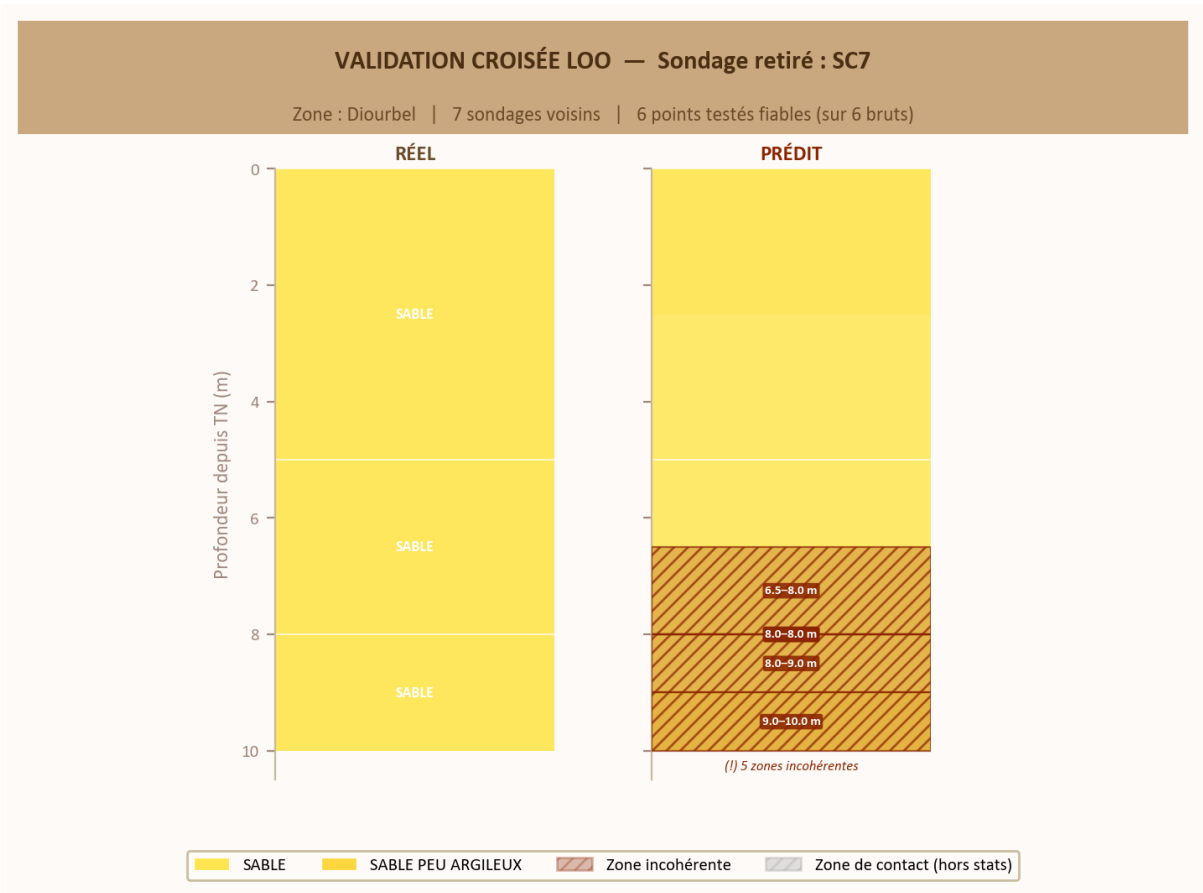


Figure B.7 Validation croisée LOO sondage SC7 retiré (Diourbel, 7 sondages voisins). Comparaison stratigraphie réelle (gauche) / prédite (droite) : 5 zones incohérentes aux contacts sable / sable peu argileux à partir de 6,5 m (Ch. 6).

B.8 Calcul de cubature

Cubature — Calcul de Volumes

1. Zone de calcul (polygone)

☒ Polygone : 4 points

Dessiner polygone sur la carte

✖ Effacer

2. Paramètres

Résolution XY :

10,00 m

Résolution Z :

1,00 m

Profondeur max depuis surface locale :

4,00 m

La profondeur est calculée depuis l'altitude de surface de chaque colonne XY du voxel.

🚀 Calculer les volumes

Volume Total : 22,400 m³

Lithologie	Volume (m ³)	Part (%)
SABLE PEU ARGILEUX	13,800	61.6%
SABLE ARGILEUX	7,200	32.1%
SABLE	1,400	6.2%

📄 Exporter CSV

Close

Figure B.8 Module Cubature (Ch. 19). Polygone de 4 points, volume total 22 400 m³ SABLE PEU ARGILEUX 61,6 %, SABLE ARGILEUX 32,1 %, SABLE 6,2 %. Résolution $\Delta XY = 10$ m, $\Delta Z = 1$ m. Export CSV intégré.

GeoSol Studio Reference Book

125

B.9 Convertisseur pressiométrique

Convertisseur Pressiométrique
Calculs Ménard · NF EN ISO 22476-4

Fichiers source

Fichier mesures * — non sélectionné — Sélectionner...

Fichier CA-ET — non sélectionné — Sélectionner...

Dossier de sortie * C:\Users\niang\Desktop Sélectionner...

Paramètres

Zone : ex: DAKAR_NORD, HLM, DIAMNIADIO...

Volume cellule V_0 : 535 cm³

(*) Sans CA-ET : aucune correction volumique appliquée.

Fermer Convertir

Figure B.9 Convertisseur Pressiométrique (NF EN ISO 22476-4). Prétraitement des fichiers bruts Ménard : lecture du certificat d'étalonnage CA-ET et du volume de cellule V_0 (535 cm³) pour calculer Pl^* et EM nets.

B.10 Fondations superficielles (GS-Surf)

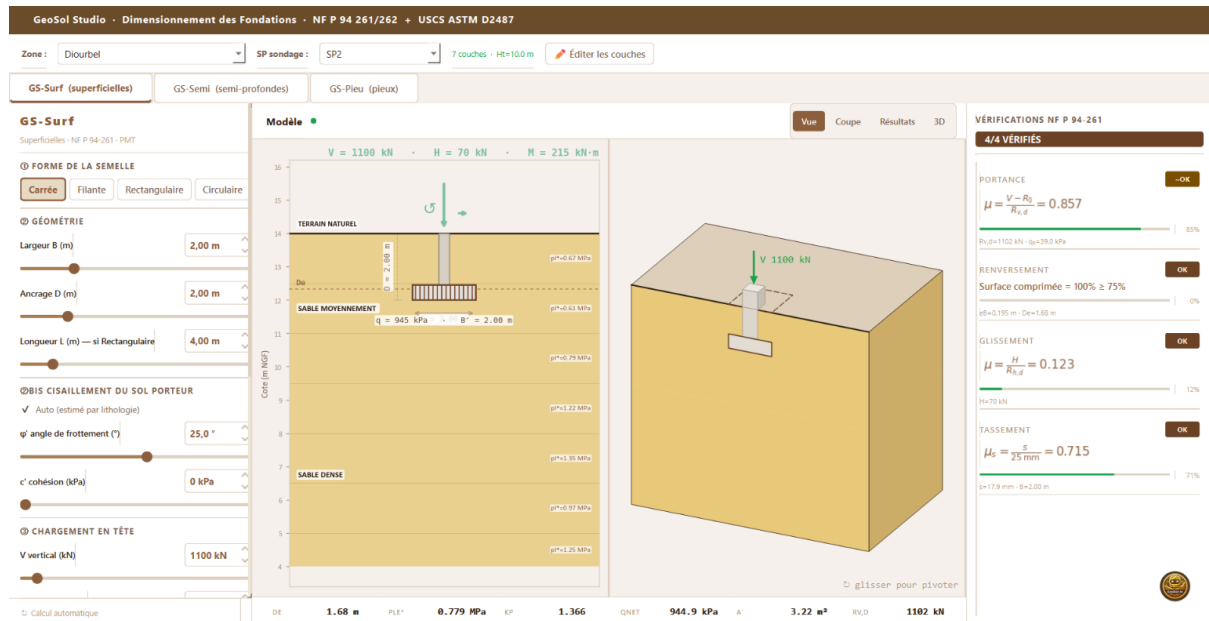


Figure B.10 Module GS-Surf : semelle carrée 2×2 m, D = 2 m, V = 1 100 kN, H = 70 kN, M = 215 kN·m (NF P 94-261). Les 4 vérifications (portance, renversement, glissement, tassement) sont satisfaites. Vue 3D interactive (Ch. 15).

B.11 Fondations semi-profondes (GS-Semi)

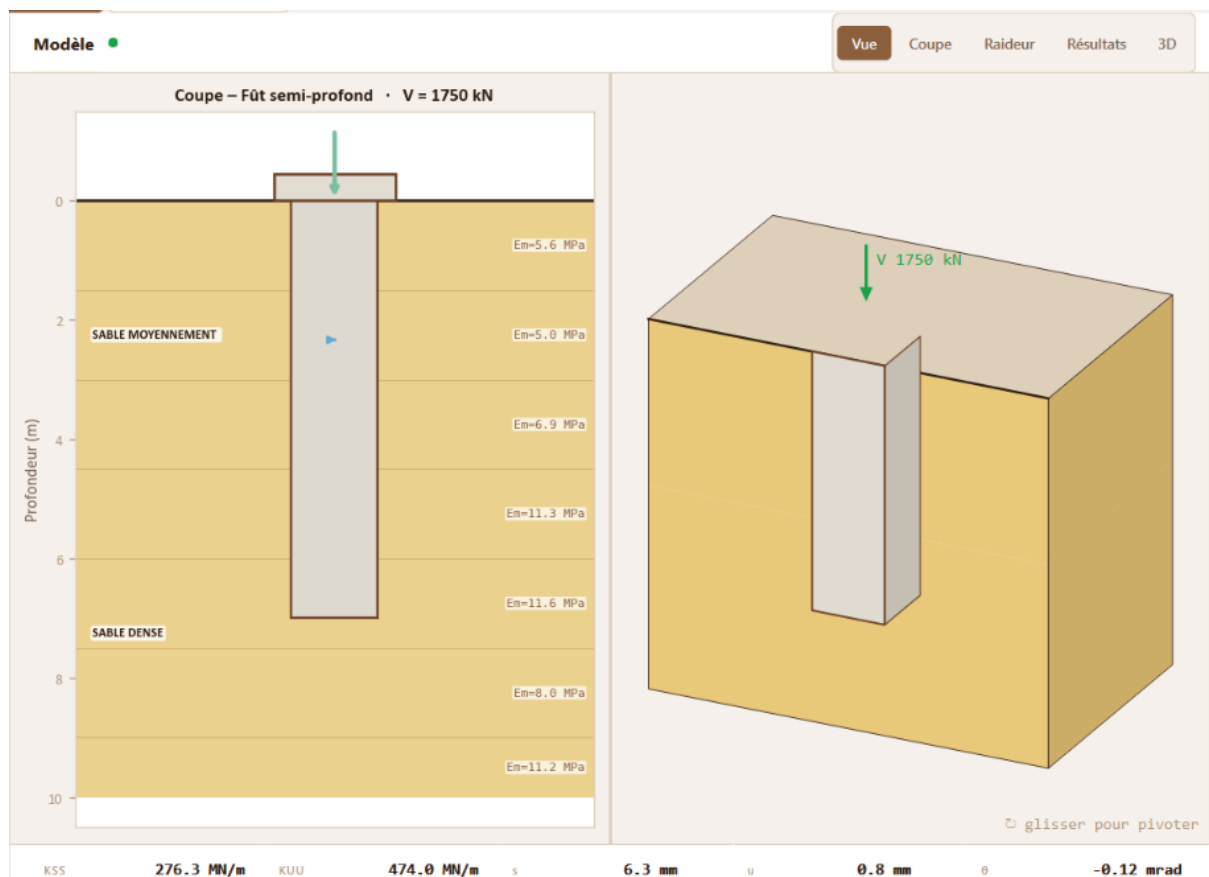


Figure B.11 Module GS-Semi : fût semi-profond sous $V = 1\,750\text{ kN}$. Profil EM par couche (5,0-11,6 MPa), $KSS = 276\text{ MN/m}$, tassement $s = 6,3\text{ mm}$ (Ch. 15).

B.12 Fondations profondes (GS-Pleu)

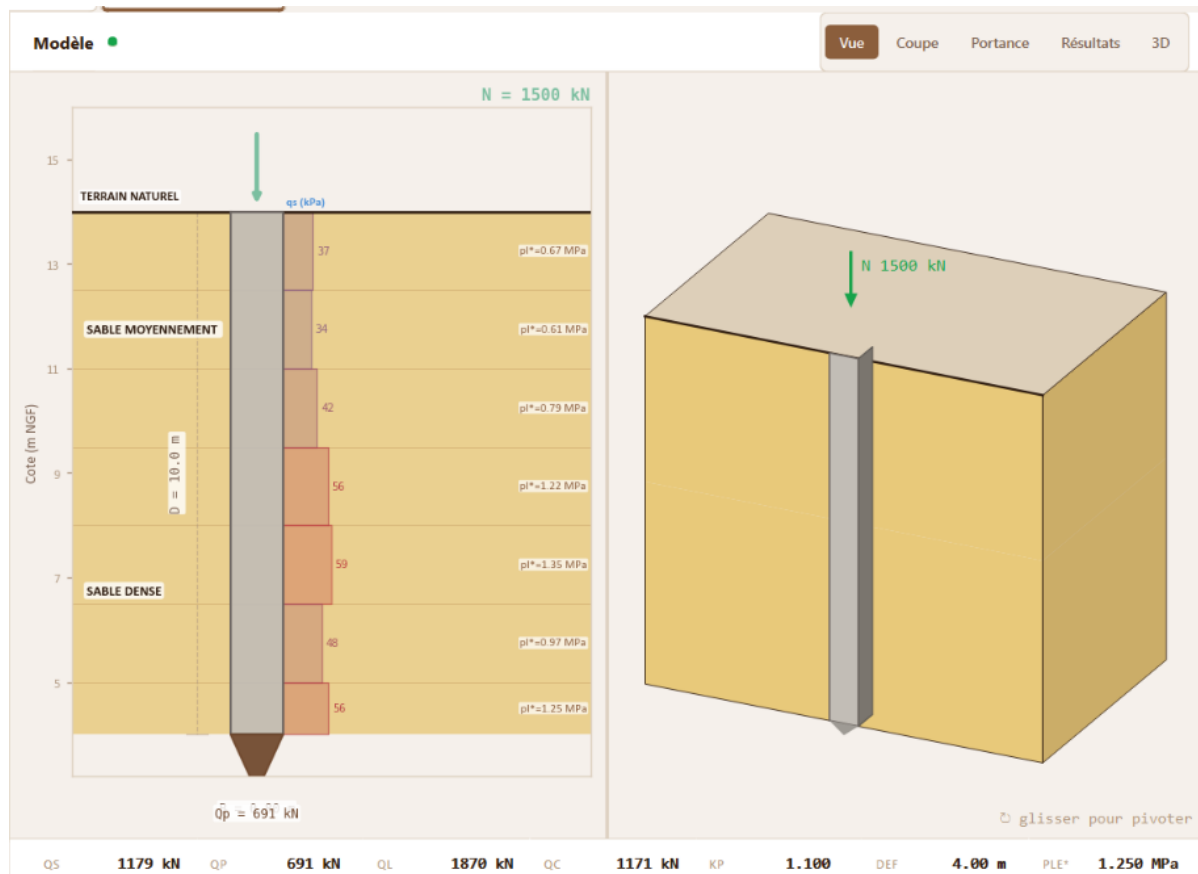


Figure B.12 Module GS-Pleu : pieu sous $N = 1\,500\text{ kN}$. Frottement latéral q_s de 34 à 59 kPa par couche, $Q_S = 1\,179\text{ kN}$, $Q_P = 691\text{ kN}$, $Q_L = 1\,870\text{ kN}$. Ancrage en sable dense à $D = 4\text{ m}$ (Ch. 16).

B.13 Copilote GeoSol AI

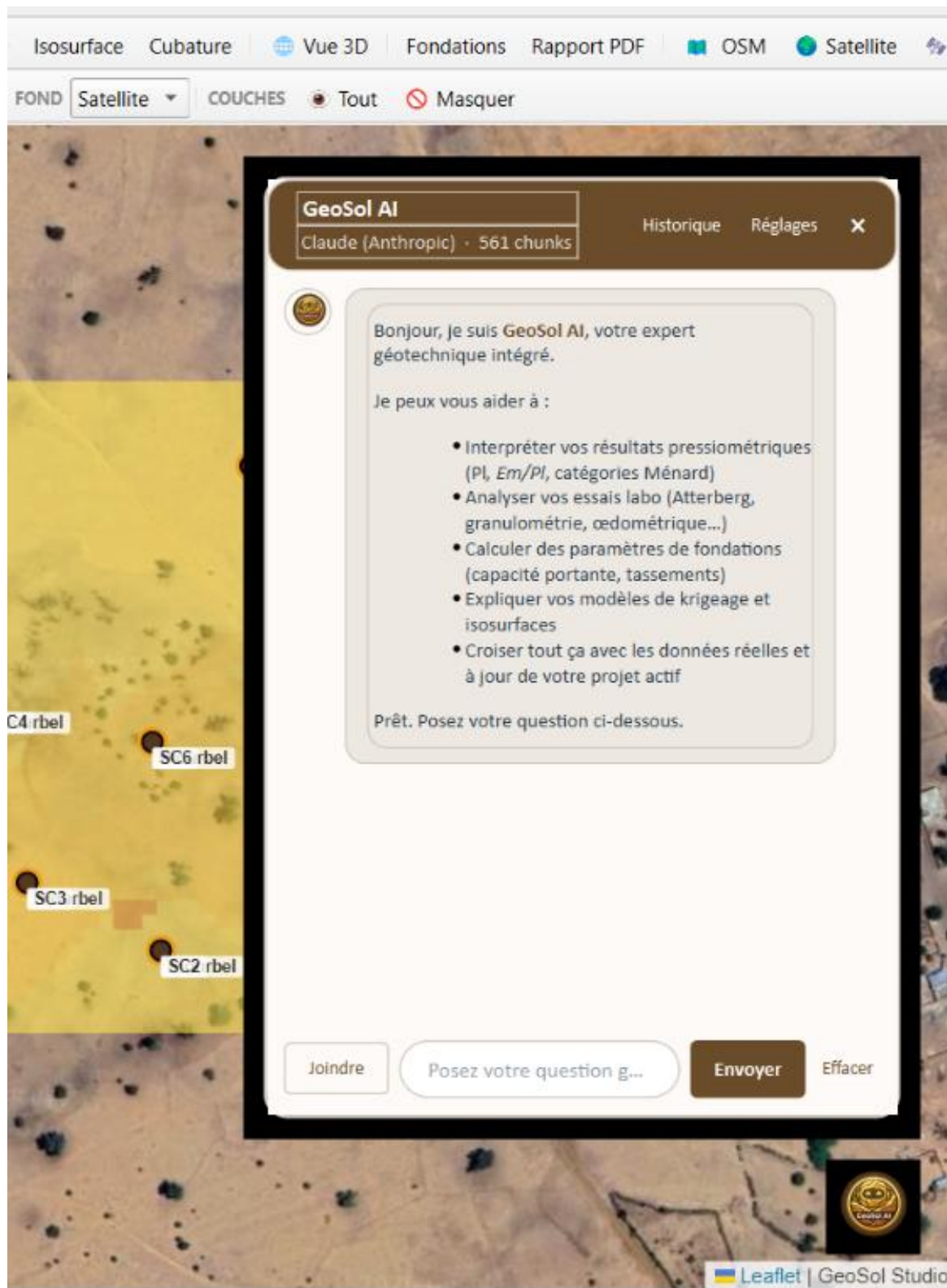


Figure B.13 Copilote GeoSol AI (Claude-Anthropic, 561 chunks contextuels). Interface conversationnelle ancrée sur les données du projet actif. Interprète résultats pressiométriques, essais labo et modèles géostatistiques en préservant la responsabilité professionnelle de l'ingénieur (Ch. 22).

Annex C Executive Summary

GeoSol Studio Reference Book

Scientific, Methodological and Normative Foundations of 3D Geotechnical and Geological Modelling

Dr. Cheikh Sadibou FAYE Mouhamed NIANG École Polytechnique de Thiès First edition, 2026

Context

West Africa's construction sector faces a documented structural challenge: inadequate geotechnical investigation practice, compounded by the absence of regionally adapted methodological references. In Senegal alone, 1,446 buildings were classified as structurally dangerous in 2021, and at least sixteen fatalities from structural collapses were recorded between 2024 and 2025. This risk is rooted not in practitioner negligence, but in the absence of accessible, scientifically grounded tools calibrated to the geological, climatic and economic context of the sub-region. This book addresses that gap.

Scope

The book presents a unified scientific framework covering the complete chain from geotechnical data acquisition to structural design and reporting. It addresses three interlocking domains: (1) geostatistical modelling of the subsoil indicator kriging, contact-surface kriging, and Leave-One-Out cross-validation; (2) in-situ and laboratory testing the Ménard pressuremeter, Atterberg limits, grain-size analysis, oedometric testing, direct shear, and free-swell testing; and (3) structural design under Eurocode 7 shallow and deep foundation dimensioning, consolidation settlement calculations, and their integration with the 3D geological model. A dedicated chapter addresses AI-assisted geotechnical practice within a grounding framework that preserves professional accountability.

Key Methodological Contributions

Three contributions distinguish this book from existing regional literature: (i) the systematic application of 3D geostatistical modelling to West African geotechnical datasets, with region-specific variogram calibration and illustrated examples from Senegal; (ii) a validated spatial interpolation framework for pressuremeter parameters, assessed via Leave-One-Out cross-validation on independent boreholes; and (iii) a critical assessment of the conditions under which Eurocode 7 and the French national annexes (NF P 94-261, NF P 94-262) apply in UEMOA member states, including the methodological precautions required where regional calibration data are sparse.

Structure

The book comprises twenty-three chapters organised into six thematic parts: (I) Foundations of digital geotechnical engineering; (II) Geostatistical subsoil modelling; (III) Pressuremeter investigation and mechanical characterisation; (IV) Laboratory testing and soil identification; (V) Structural design methods; (VI) Reporting, interoperability and professional perspectives. Each chapter opens with a state-of-the-art framing and closes with a synthesis section connecting its methodological contribution to the wider practice chain. The book is complemented by a glossary, a normative reference index, a bibliography, and two illustrated annexes presenting data collection templates (Annex A) and GeoSol Studio software modules (Annex B).

Target Audience

The book is addressed to geotechnical and civil engineers, university instructors and graduate students in engineering programmes, and institutional stakeholders working on the normative and educational infrastructure of sub-Saharan Africa's construction sector. Each chapter is written to be read independently, making the book both a practitioner's desk reference and a teaching companion.

Keywords: geotechnics, geostatistics, kriging, pressuremeter, Eurocode 7, West Africa, UEMOA, Senegal, consolidation settlement, foundation design, data management, 3D geological modelling, Leave-One-Out, AI-assisted engineering.

Glossaire

Variogramme. Fonction quantifiant la dissemblance moyenne entre deux mesures d'une variable régionalisée en fonction de la distance qui les sépare.

Krigeage. Méthode d'estimation linéaire à variance minimale exploitant la corrélation spatiale décrite par le variogramme.

Krigeage d'indicatrice. Krigeage appliqué à une variable binaire de présence/absence, produisant une carte de probabilité par catégorie.

Leave-One-Out (LOO). Procédure de validation croisée retirant successivement chaque observation pour évaluer la capacité prédictive d'un modèle.

Pression limite nette (PI*). Paramètre pressiométrique Ménard caractérisant la résistance limite du sol mobilisée à grande déformation.

Module pressiométrique (EM). Paramètre pressiométrique Ménard caractérisant la raideur du sol dans le domaine pseudo-élastique.

Limite de liquidité (wL). Teneur en eau marquant la transition entre l'état liquide et l'état plastique d'un sol fin.

Indice de plasticité (Ip). Différence entre limite de liquidité et limite de plasticité, mesurant l'étendue du domaine plastique.

Indice de compression (Cc). Pente de la branche vierge de la courbe de compressibilité œdométrique dans le plan e - $\log(\sigma')$.

Indice de gonflement (Cs). Pente de la branche de décharge/recompression de la courbe de compressibilité œdométrique.

Pression de préconsolidation (σ'_p). Contrainte effective maximale historiquement subie par un sol, déterminée par la construction de Casagrande.

Sol surconsolidé. Sol pour lequel la contrainte effective en place est inférieure à la pression de préconsolidation.

Critère de Mohr-Coulomb. Modèle linéaire de résistance au cisaillement reliant contrainte de rupture, cohésion et angle de frottement.

Coefficient d'uniformité (Cu). Rapport D_{60}/D_{10} caractérisant l'étalement de la distribution granulométrique d'un sol.

État-limite. Seuil de comportement (rupture ou déformation excessive) au-delà duquel un ouvrage ou un sol ne satisfait plus l'usage prévu.

Ancrage (grounding). Discipline méthodologique imposant à un système d'aide à la décision de distinguer données vérifiées et connaissance générale non vérifiée.

Référentiel normatif applicable

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des normes et référentiels cités dans cet ouvrage, classés par domaine d'application. Il constitue un point d'entrée rapide pour le lecteur souhaitant retrouver le texte normatif applicable à une méthode ou un essai donné.

Référentiel	Objet	Portée
NF EN 1997-1 (Eurocode 7)	Calcul géotechnique règles générales	Cadre des états-limites et coefficients partiels
NF P 94-261	Fondations superficielles	Application nationale EC7 méthode pressiométrique
NF P 94-262	Fondations profondes	Application nationale EC7 méthode pressiométrique
NF P 94-110-1 / NF EN ISO 22476-4	Essai pressiométrique Ménard	Protocole d'essai, Pl* et EM
NF P 94-051	Limites d'Atterberg	wL, wP, Ip, IL, classification USCS
NF P 94-057 / NF EN ISO 17892-4	Analyse granulométrique	Tamissage, sédimentométrie, D10/D50/D60, Cu, Cc
NF P 94-090-1 / XP CEN ISO/TS 17892-5	Essai œdométrique	Cc, Cs, pression de préconsolidation σ'_p
NF P 94-071-1	Cisaillement direct	Enveloppe de Mohr-Coulomb, c' , φ'
NF P 94-091	Gonflement libre	Potentiel de gonflement

Références bibliographiques

- [1] Ministère de l'Urbanisme, du Logement et de l'Hygiène publique Sénégal (2021). Rapport de recensement des bâtiments menaçant ruine. Gouvernorats régionaux, octobre 2021.
- [2] NF EN 1997-1 (2005) / Eurocode 7. Calcul géotechnique Partie 1 : Règles générales. AFNOR, Paris.
- [3] Kamtchueng, B.T., Onana, V.L., Fantong, W.T., Ueda, A., Ntoulala, R.F., Wongolo, M.H., Ndong, G.B., Ngo'o Ze, A., Kamgang, V.K. & Ondoa, J.M. (2015). Geotechnical, chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou, Central-Cameroon): implications for road construction. *International Journal of Geo-Engineering*, 6, 13.
- [4] Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58(8), 1246-1266.
- [5] Chilès, J.-P. & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty* (2e éd.). John Wiley & Sons, 699 p.
- [6] Kim, M., Kim, H.S. & Chung, C.K. (2020). A Three-Dimensional Geotechnical Spatial Modeling Method for Borehole Dataset Using Optimization of Geostatistical Approaches. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(3), 778-793.
- [7] Ménard, L. (1967). Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations. *Techniques Louis Ménard*, Paris.
- [8] NF P 94-110-1 (2000). Essai pressiométrique Ménard Partie 1 : Essai sans cycle. AFNOR, Paris.
- [9] NF EN ISO 22476-4 (2021). Investigations et essais géotechniques Essai au pressiomètre Ménard. AFNOR.
- [10] NF P 94-051 (1993). Détermination des limites d'Atterberg. AFNOR, Paris.
- [11] Thomas, P.J., Baker, J.C. & Zelazny, L.W. (2000). An Expansive Soil Index for Predicting Shrink-Swell Potential. *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), 268-274.
- [12] NF EN ISO 17892-4 (2018). Essais de laboratoire Distribution granulométrique. AFNOR.
- [13] NF P 94-090-1 (1997). Essai œdométrique Partie 1 : Chargement par paliers. AFNOR, Paris.
- [14] NF P 94-071-1 (1994). Cisaillement rectiligne à la boîte Partie 1 : Cisaillement direct. AFNOR, Paris.
- [15] Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2e éd.). John Wiley & Sons.
- [16] NF P 94-091 (1995). Essai de gonflement à l'œdomètre. AFNOR, Paris.
- [17] NF P 94-261 (2013). Fondations superficielles Application nationale de l'Eurocode 7. AFNOR, Paris.
- [18] NF P 94-262 (2012). Fondations profondes Application nationale de l'Eurocode 7. AFNOR, Paris.

- [19] Wu, J., Chen, J., Chen, G., Wu, Z., Zhong, Y., Chen, B., Ke, W. & Huang, J. (2021). Development of Data Integration and Sharing for Geotechnical Engineering Information Modeling Based on IFC. *Advances in Civil Engineering*, 2021, Article 8884864.
- [20] Kenthapadi, K., Sameki, M. & Taly, A. (2024). Grounding and Evaluation for Large Language Models: Practical Challenges and Lessons Learned (Survey). *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '24)*.
- [21] Journel, A.G. & Huijbregts, Ch.J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press, Londres, 600 p.
- [22] Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke, Vienne.
- [23] Casagrande, A. (1936). The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proc. 1st ICSMFE, Harvard*, vol. 3, 60-64.
- [24] XP CEN ISO/TS 17892-5 (2005). *Essais de laboratoire sur les sols Essai œdométrique*. AFNOR.
- [25] Müller, S., Schüller, L., Zech, A. & Heße, F. (2022). GSTools v1.3: a toolbox for geostatistical modelling in Python. *Geoscientific Model Development*, 15(7), 3161-3182.

GeoSol Studio contact@geosol-studio.com www.geosol-studio.com