

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر

UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR



Faculté des sciences et de technologie

Département de génie civil et d'hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en Génie civil

Spécialité : Géotechnique

Thème :

Utilité des cartes géotechniques pour l'aménagement et l'urbanisme

Présenté par :

M^{elle} : CHIKHI Ikrame & M. LADMEK Noredine

Soutenu le 21 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

M. HACHEMI Houari :	Maitre de Conférences « A »		Président
M. BELOUADI. Larbi :	Maitre de Conférences « A »		Encadreur
Mme GHAFIR Meriem :	Maitre-assistant « A »		Examineur

Année universitaire : 2025 / 2026

Résumé

L'urbanisation croissante, liée à la démographie et aux migrations, transforme les territoires et génère des défis d'aménagement de l'espace. La maîtrise des contraintes du sous-sol est essentielle pour la sécurité des ouvrages et la résilience des villes. La connaissance des propriétés géotechniques des sols (portance, perméabilité, etc.) est un préalable à tout projet d'urbanisme. Son ignorance expose à des risques graves comme les tassements ou glissements de terrain, avec des conséquences humaines et économiques. Face à ce constat, la cartographie géotechnique s'impose comme un outil stratégique d'aide à la décision. Elle synthétise les données géologiques et mécaniques pour intégrer la stabilité des ouvrages de génie civil dès la planification. Elle identifie les zones vulnérables, oriente l'implantation des infrastructures et rationalise l'usage de l'espace urbain. Cet outil s'inscrit dans une logique d'aménagement durable, conciliant développement urbain et prévention des risques. Il participe à l'élaboration de documents d'urbanisme mieux informés et à la réduction des coûts de maintenance. Ce mémoire analyse le rôle des cartes géotechniques, leurs modalités d'élaboration et les apports des SIG pour une analyse dynamique des territoires.

Mots clés : Urbanisation, Cartographie géotechnique, Risques naturels, Aménagement durable, SIG (Systèmes d'information géographique)

Abstract:

Growing urbanisation, linked to demographics and migration, is transforming landscapes and creating spatial planning challenges. Understanding the constraints of the subsoil is essential for the safety of structures and the resilience of cities. Knowledge of the geotechnical properties of soils (bearing capacity, permeability, etc.) is a prerequisite for any urban planning project. Ignorance of these properties exposes projects to serious risks such as subsidence or landslides, with human and economic consequences. In light of this, geotechnical mapping has emerged as a strategic decision-making tool. It synthesises geological and mechanical data to incorporate the stability of civil engineering structures from the planning stage onwards. It identifies vulnerable areas, guides the siting of infrastructure and optimises the use of urban space. This tool is part of a sustainable planning approach, reconciling urban development with risk prevention. It contributes to the production of better-informed urban planning documents and to the reduction of maintenance costs. This thesis analyses the role of geotechnical maps, how they are produced, and the contributions of GIS to dynamic territorial analysis.

Keywords: Urbanisation, Geotechnical mapping, Natural hazards, Sustainable development, GIS (Geographic Information Systems).

ملخص:

التوسع الحضري المتزايد والمرتبط بالنمو السكاني والهجرة، يغيران شكل المجال الحضري ويخلق تحديات في تخطيط الإقليم. إن التحكم في خصائص التربة أمر ضروري لضمان سلامة المنشآت ومرونة المدن. إن معرفة الخصائص الجيوتقنية للتربة (قدرة التحمل، النفاذية، إلخ) هي شرط أساسي لأي مشروع تخطيط حضري ويؤدي إهمالها إلى التعرض لمخاطر جسيمة مثل الانخفاضات أو الانهيارات الأرضية، مع ما يترتب على ذلك من عواقب بشرية واقتصادية. وفي ضوء ذلك، تبرز الخرائط الجيوتقنية كأداة استراتيجية للمساعدة في اتخاذ القرار. فهي تجمع بين البيانات الجيولوجية والميكانيكية لدمج استقرار المنشآت المدنية منذ مرحلة التخطيط. كما تحدد المناطق المعرضة للخطر، وتوجه إنشاء البنية التحتية، وترشد استخدام المجال الحضري. تندرج هذه الأداة في إطار منطق التخطيط المستدام، الذي يوفق بين التنمية الحضرية والوقاية من المخاطر. وتساهم في إعداد وثائق تخطيط حضري أكثر استنارة وفي خفض تكاليف الصيانة. تحلل هذه الأطروحة دور الخرائط الجيوتقنية، وطرق إعدادها، ومساهمات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) في التحليل الديناميكي للأراضي.

الكلمات المفتاحية: التحضر، رسم الخرائط الجيوتقنية، المخاطر الطبيعية، التخطيط المستدام، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)

شكر وتقدير

أتقدم بأسمى عبارات الشكر والعرفان إلى الأستاذ المشرف بلوادي على إشرافه على هذا العمل، وما قدمه لي من توجيهات علمية قيّمة، ونصائح بّناءة، ومتابعة مستمرة منذ بداية هذا المشروع إلى غايته.

كما أشكره على صبره، وسعة صدره، وتشجيعه الدائم، وثقته التي كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل في أحسن صورة ممكنة.

وأتوجه كذلك بخالص الشكر إلى أساتذتي الكرام بكلية العلوم والتكنولوجيا على ما قدموه من علم وتكوين طوال مساري الدراسي.

ولا يفوتني أن أشكر عائلتي وأصدقائي على دعمهم المتواصل وتشجيعهم الدائم.

لكم جميعاً مني فائق الاحترام والتقدير

الإهداء

أهدي هذا العمل المتواضع

إلى والديّ العزيزين، رمز الحب والتضحية، اللذين كانا سندي في كل خطوة من حياتي، ولم يبخلا عليّ بالدعم والتشجيع.

إلى عائلتي الكريمة، التي منحتني القوة والإصرار من أجل مواصلة دراستي وتحقيق هذا النجاح

إلى أساتذتي الأفاضل، الذين أناروا طريقي بالعلم والمعرفة، وكانوا خير عون لي في مسيرتي الدراسية

إلى أصدقائي الأعزاء، الذين شاركوني أجمل اللحظات وساندوني في أصعب الأوقات

وإلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل

لكم جميعاً أهدي ثمرة جهدي هذا بكل حب وامتنان

Table des matières

Liste des figures-----	IX
Liste des tableaux-----	X
Introduction générale-----	11
Chapitre I : Cartographie géotechnique, concepts et définitions -----	14
<i>I-1. Introduction</i> -----	14
<i>I-2. Aperçu historique de la cartographie</i> -----	15
<i>I-3. Définition de la carte géotechnique</i> -----	16
<i>I-4. Contenus de la carte géotechnique</i> -----	17
<i>I-5. Classification des cartes géotechniques</i> -----	21
I-5-2. Classification selon le contenu-----	22
I-5-3. Classification Selon l'échelle -----	23
I-5-4. Les cartes auxiliaires -----	24
<i>I-6. Exemples de cartes géotechniques</i> -----	25
I-6-1. Carte de stabilité des sols -----	25
I-6-2. Carte des risques géotechniques -----	30
I-6-3. Complémentarité des cartes de stabilité et des risques géotechniques -----	33
Chapitre II : Méthodologie d'élaboration des cartes géotechniques -----	36
<i>II.1. Introduction</i> -----	36
<i>II.2. Méthodologie de production des cartes géotechniques</i> -----	36
II.2.1. Recherches préalables et collecte des données-----	37
II.2.1.1. Collecte documentaire-----	37
II.2.1.2. Analyse des données existantes -----	38
II.2.1.3. Planification des investigations -----	38
<i>II.3. Travaux de terrain</i> -----	39
II.3.1. Relevés géophysiques -----	40
II.3.1.1. Sismique réfraction -----	40
II.3.1.2. Résistivité électrique -----	41
II.3.2. Essais in situ.-----	41
II.3.2.1. Pénétrromètre-----	42
II.3.2.2. Scissomètre -----	42
II.3.3. Forages géotechniques-----	45
II.3.3.1. Échantillonnage -----	45
II.3.3.2. Vérification -----	46
<i>II.4. Travaux de laboratoire</i> -----	46
II.4.1. Sols granulaires-----	46
II.4.1.1. Analyse granulométrique -----	47
II.4.2. Sols cohérents-----	48

II.4.2.1. Résistance au cisaillement -----	48
II.4.2.2. Teneur en eau -----	49
II.4.2.3. Limites d'Atterberg -----	49
II.4.2.4. Autres essais -----	50
II.5. Traitement et interprétation des données -----	50
II.5.1. Classification des sols -----	51
II.5.2. Analyse des propriétés géotechniques -----	51
II.6. Modélisation spatiale (SIG, krigeage) -----	52
II.6.1. Géostatistique et krigeage -----	52
II.6.1.1. Principes et fondements théoriques du Krigeage -----	53
II.6.1.2. Le variogramme. -----	54
II.6.2. Intégration du krigeage dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) -----	55
II.6.2.1. Processus d'intégration. -----	55
II.6.2.2. Apports de l'intégration SIG-krigeage. -----	56
II.7. Édition et diffusion des cartes géotechniques -----	56
II.7.1. Formats numériques et imprimés -----	57
II.7.2. Rapports techniques -----	57
II.7.3. Accessibilité des données -----	58
II.7.4. Mise à jour et actualisation des cartes géotechniques -----	58
II.7.4.1. Fréquence et modalités de mise à jour -----	59
II.8. Apport des nouvelles technologies -----	59
II.8.1. Technologies modernes -----	61
II.8.2. Coordination institutionnelle -----	61
II.9. Limites et perspectives des cartes géotechniques -----	62
II.9.1. Limites techniques -----	63
Conclusion -----	66
Chapitre III : Utilité des cartes géotechniques dans l'aménagement du territoire -----	68
III.1. Introduction -----	68
III.1.1. 1. Cadre général de l'aménagement et de l'urbanisme -----	69
III.1.2. Contraintes naturelles et anthropiques -----	70
III.1.3. Les Plans d'urbanisme (PDAU et POS) : rôle et objectifs -----	71
III.1.3.1. Le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) -----	72
III.1.3.2. Le Plan d'Occupation du Sol (POS) -----	72
III.2. Intégration des cartes géotechniques dans l'aménagement -----	74
III.2.1. Contribution à l'orientation stratégique de l'aménagement du territoire -----	74
III.2.2. Identification des zones favorables à l'urbanisation -----	75
III.2.3. Hiérarchisation des zones d'aménagement fonctionnel -----	77
III.2.4. Aide à la prise de décision -----	79
III.2.5. Gestion et prévention des risques géotechniques -----	80
III.2.5.1. Identification des zones à risques -----	82
III.2.5.2. Prévention des glissements de terrain -----	83
III.2.5.3. Gestion des risques d'inondation -----	85

III.2.5.4. Prévention des tassements et affaissements -----	88
III.2.6. Application dans la planification des infrastructures -----	89
III.2.7. Choix des sites de construction -----	90
III.2.8. Adaptation des fondations aux conditions du sol -----	92
III.2.9. Planification des infrastructures de transport -----	94
III.3. Impact sur l'organisation urbaine -----	95
III.4. Conséquences de l'absence d'études géotechniques -----	96
III.5. Contraintes réglementaires et juridiques -----	97
III.6. Recommandations pratiques pour l'exploitation optimale des cartes géotechniques -----	98
III.6.1. Encourager la production et la mise à jour régulière des cartes -----	98
III.6.2. Favoriser la formation et la sensibilisation des acteurs territoriaux -----	98
III.6.3. Intégrer systématiquement les cartes dans les documents d'urbanisme et les politiques locales -----	98
III.6.4. Développer des plateformes numériques collaboratives ouvertes -----	98
III.6.5. Promouvoir la recherche et l'innovation technologique -----	98
Conclusion -----	99
Conclusion générale -----	100
Perspectives -----	Erreur ! Signet non défini.
Références bibliographiques -----	101

Liste des figures

Figure 1: Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Saïda [12].	19
Figure 2: Carte géologique du bassin versant de Saïda (In Mansour. H, 2012). [13].	20
Figure 3: Carte géodynamique simplifiée de la Méditerranée orientale avec les failles majeures et les vecteurs de déplacement relatifs à l'Eurasie [14].	21
Figure 4: Carte des pentes, la vallée d'Ossau, Pyrénées-Atlantiques, 2000 [16].	26
Figure 5 : Carte isovaleur d'angle de frottement φ °, Commune de Azazga (Algérie) [17].	27
Figure 6: Carte ZERMOS de la moyenne Vésubie, à l'échelle 1/25 000 : légende et extrait de carte, levés de MM. Calvino et Méneroud [16].	29
Figure 7 : Carte des zones vulnérables à l'érosion hydrique, Bassin versant l'Oued Zgane. (H.OUSMANA et al, 2017) [18].	31
Figure 8 : Zonage d'aléa prenant en compte la possibilité d'extension vers l'amont des glissements actifs dans le Calvados [16].	33
Figure 9 : Graphique de la résistance à la pénétration des sols (CPT) [22].	43
Figure 10 : Profil vertical de la résistance au cisaillement des sols » [10].	44
Figure 11 : Diagramme de plasticité des sols (Indice de plasticité IP) [04].	50
Figure 12 : Carte des secteurs d'urbanisation, ville d'Ain Témouchent (Algérie). [37]	71
Figure 13 : Plan d'occupation du sol de la ville d'El-Eulma (Algérie), (PDAU, 2008). [38]	73
Figure 14: Carte des terrains non urbanisables (terres agricoles) de la ville d'El-Eulma (Algérie) (PDAU, 2008). [38]	75
Figure 15: Carte de constructibilité de Souk Ouled Nedjaa, Alger 2018. [39]	76
Figure 16: Carte de composition urbaine de la ville de Saïda, PDAU 2014. [40]	78
Figure 17: Carte d'exposition au risque d'explosion, cas du centre enfuteur El-Eulma, PDAU 2008. [38].	79
Figure 18: Carte d'Aléa de rupture, commune du Mont-Dore pour les chutes de blocs.[41]	81
Figure 19 : Carte de susceptibilité aux « mouvements de versants » (Riou-Bourdoux) (In J. PHILIPPE MALET, Strasbourg, 2009). [42]	82
Figure 20 : Carte d'Aléa de mouvement de terrain, commune du Mont-Dore, (Nouvelle Calédonie). [41].	85
Figure 21 : Carte des zones vulnérables à l'érosion hydrique (H. OUSMANA et al, 2017).[43]	86
Figure 22 : Carte des risques, Région de Bruxelles-Capitale 2020. [44]	87
Figure 23 : Carte de distribution des équipements de base (école primaire), ville d'El-Eulma, PDAU 2008. [38].	91
Figure 24 : Carte de la friabilité des matériaux (A.Elaloui et al, 2015). [45]	93

Liste des tableaux

Tableau 1 : Essais géotechniques et paramètres mesurés. [01].....	41
Tableau 2 : Classification des sols selon la résistance à la compression simple (Rc). [02]	44
Tableau 3: Teneur en eau et autres propriétés	49
Tableau 4: Synthèse des principales méthodes de krigeage et de leur pertinence en géotechnique.	54

Introduction générale

L'urbanisation constitue l'un des phénomènes les plus caractéristiques des sociétés contemporaines. Sous l'effet conjugué de l'accroissement démographique, des migrations des populations vers les centres urbains et des mutations économiques, les centres urbains connaissent une expansion sans précédent qui transforme en profondeur les territoires et leurs usages. Cette dynamique, si elle est porteuse de développement, engendre également une pression accrue sur les espaces disponibles et soulève des défis majeurs en matière d'aménagement, de construction et de gestion des risques. Dans ce contexte, la maîtrise des contraintes physiques du sous-sol s'impose comme une condition essentielle à la sécurité des ouvrages, à la pérennité des infrastructures et à la résilience des villes face aux aléas naturels.

La connaissance des propriétés géotechniques des formations superficielles constitue, en effet, un préalable fondamental à toute opération d'urbanisme ou de génie civil [1] La nature des sols, leur capacité portante, leur perméabilité, leur compressibilité ou encore leur sensibilité aux phénomènes de retrait-gonflement déterminent directement les modalités de conception et de réalisation des ouvrages. Une méconnaissance de ces paramètres expose les projets à des risques multiples : tassements différentiels, glissements de terrain, instabilité des fondations, voire sinistres graves affectant les biens et les personnes. L'histoire récente de l'aménagement urbain, en Algérie comme dans d'autres régions méditerranéennes, atteste des conséquences coûteuses, tant sur le plan humain qu'économique, d'une insuffisante prise en compte des réalités du sous-sol [2].

Face à ce constat, la cartographie géotechnique s'est progressivement imposée comme un instrument stratégique d'aide à la décision. Elle consiste en la synthèse et la représentation spatialisée des informations relatives à la géologie, à la géomorphologie, à l'hydrogéologie et aux propriétés mécaniques des sols et des roches. En offrant une vision globale et hiérarchisée des contraintes et des potentialités du terrain, elle permet aux urbanistes, ingénieurs et décideurs d'intégrer dès les phases amont de la planification les exigences liées à la stabilité et à la durabilité des ouvrages. Au-delà de sa fonction descriptive, la carte géotechnique revêt une dimension préventive : elle identifie les zones vulnérables aux aléas naturels, oriente les choix d'implantation des infrastructures, et contribue à la rationalisation de l'usage de l'espace urbain.

Dans un contexte marqué par l'impératif de résilience urbaine face au changement climatique et par la nécessité de maîtriser les coûts de construction et de maintenance, la cartographie géotechnique apparaît comme un levier essentiel pour concilier développement urbain et prévention des risques. Elle participe à l'élaboration de documents d'urbanisme mieux informés, à la délimitation de zones constructibles adaptées aux réalités du sous-sol, et à la réduction des interventions correctives coûteuses qui pèsent lourdement sur les budgets publics et privés.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique centrale. Il a pour objectif d'analyser en profondeur le rôle des cartes géotechniques dans les processus d'aménagement et d'urbanisme, en mettant en lumière leurs apports, leurs modalités d'élaboration et les conditions de leur intégration efficace dans les politiques territoriales. Après avoir rappelé les fondements méthodologiques de la cartographie géotechnique et les principaux types de cartes utilisés, nous examinerons leur contribution à la gestion des risques naturels, à la planification des infrastructures et à l'orientation stratégique des choix d'urbanisation. Nous nous interrogerons également sur les perspectives offertes par les avancées technologiques récentes, notamment l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG), qui permettent de dépasser la simple représentation statique pour accéder à une analyse dynamique et multicritère des territoires.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre, présente d'abord des généralités sur la cartographie qui portent sur les concepts et les définitions de la cartographie géotechnique, il décrit en suite les principaux types des cartes géotechniques en mettant en évidence les différents thèmes objets de la cartographie géotechnique.

Le deuxième chapitre présente de manière succincte le cadre général de la méthodologie d'élaboration des cartes, en soulignant l'importance de chaque étape pour la réalisation des cartes géotechniques. Cette repose sur une approche rigoureuse et multidisciplinaire, depuis le recueil des données issues de sources variées, l'analyses approfondies et modélisation. Par ailleurs, l'actualisation régulière des cartes demeure un enjeu majeur, car le sous-sol est soumis à des évolutions naturelles et anthropiques qui peuvent modifier significativement ses propriétés au fil du temps.

Le troisième chapitre propose dans un premier temps un aperçu panoramique sur les plans d'urbanisme à savoir, le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) et le Plan d'Occupation du Sol (POS). Il explore ensuite l'utilité des cartes géotechniques en mettant en exergue leur rôle clé dans la prise de décisions éclairées en matière d'urbanisme, l'évaluation et la prévention des risques géotechniques et l'optimisation des choix des sites d'implantation des projets urbains.

L'objectif de ce travail vise à mettre en exergue l'utilité et le rôle des cartes géotechniques comme outils d'aide à la décision pour une urbanisation plus sûre, plus durable et mieux adaptée aux réalités du sous-sol. En s'appuyant sur une revue de la littérature scientifique, des références réglementaires et des études de cas concrets, ce mémoire démontre que la connaissance fine du terrain, loin d'être une contrainte technique secondaire, constitue un préalable indispensable à tout projet d'aménagement responsable et résilient.

Chapitre I : Cartographie géotechnique, concepts et définitions

I-1. Introduction

La cartographie géotechnique est un outil scientifique et méthodique dont l'objectif principal est de représenter de manière structurée l'ensemble des informations relatives aux propriétés physiques, mécaniques et hydrogéologiques du sol et du sous-sol d'une région ou d'un territoire donné. Elle ne se limite pas à une simple compilation de données mais elle intègre des connaissances issues de multiples disciplines telles que la géologie, la géomorphologie, l'hydrogéologie et la mécanique des sols, permettant ainsi de produire une vision complète et cohérente de l'environnement à analyser.

En pratique, la cartographie géotechnique a un rôle de connexion entre la science fondamentale (théorie) et l'application technique. Les données collectées sont restituées visuellement via des cartes et graphiques facilitant une lecture lisible et synthétique pour une interprétation des caractéristiques du sol.

La profusion documentaire relative aux études géotechniques pose des défis majeurs en matière de stockage et de gestion. Les sources demeurent abondantes mais peu accessibles dans les archives des maîtres d'ouvrage, bureaux d'études et entreprises. Les causes de dégradation des ouvrages fondations – et par extension des structures – sont multiformes : milieux agressifs (chimiques, biologiques), malfaçons d'exécution, erreurs d'interprétation des sondages et fautes de calcul. Néanmoins, l'absence de reconnaissance géotechnique préalable constitue le facteur prédominant et le plus critique. Dans ce contexte, l'élaboration d'une carte géotechnique numérique s'impose comme un outil stratégique pour éclairer la prise de décision, optimiser la gestion des ressources naturelles, guider l'aménagement du territoire, l'urbanisation et les projets de construction.

L'informatique contemporaine offre un soutien décisif à la cartographie géotechnique via une triple fonctionnalité : la banque de données ou base de données permettant le stockage structuré et sécurisé des informations ; l'analyse statistique qui aide au traitement et la modélisation des données ; et enfin, la cartographie automatisée qui permet la visualisation interactive et actualisable à la fois [3].

Les cartes géotechniques demeurent des outils de travail efficaces et de décision éclairée à la disposition des ingénieurs et planificateurs. Elles ont un rôle déterminant en matière de prévision face à différentes sollicitations et d'anticipation des comportements éventuels des terrains supports d'action d'urbanisme et de construction. La cartographie géotechnique contribue donc à la réduction des risques liés à l'instabilité des sols, à l'amélioration de la durabilité des infrastructures et à l'optimisation des coûts des projets de construction. Par d'un autre point de vue, la cartographie géotechnique joue un rôle pédagogique important en synthétisant des informations complexes sous une forme de cartes compréhensible par des intervenants non spécialistes impliqués dans l'acte de bâtir, tels que les décideurs publics ou les acteurs de l'aménagement du territoire.

I-2. Aperçu historique de la cartographie

L'histoire de la cartographie se déploie à travers plusieurs périodes marquantes, dont l'Antiquité constitue le socle fondateur. Claude Ptolémée, érudit grec résidant à Alexandrie en Égypte, s'impose comme le cartographe le plus ancien connu, décédé vers 165 de notre ère. Précurseur de la sphéricité terrestre, il excella en astronomie, géographie et mathématiques. Son œuvre majeure, la Géographie, synthétise les savoirs antiques sur le monde, complétée d'un guide méthodique pour la confection de cartes régionales ou générales. À cette fin, Ptolémée compila les coordonnées géographiques d'environ 8 000 localités, villes et sites remarquables [4].

La période médiévale se caractérise par une transmission et une transformation contrastée des héritages antiques. Les savants arabes approfondirent et respectèrent fidèlement les travaux de Ptolémée, tandis que les théologiens chrétiens subordonnèrent la cartographie à un cadre théologique rigide. Entre 300 et 1100 de notre ère, la cartographie périclita en Occident, bien que quelques cartes aient subsisté, couvrant le monde connu des Anciens et témoignant d'une persistance résiduelle de la pratique [5].

De la Renaissance, la cartographie connaît un essor technique et exploratoire décisif. Les avancées en arpentage permirent aux géomètres de dresser des plans précis de villes (la première moitié du XVI^e siècle,), provinces ou nations entières [6]. Les Grandes Découvertes facilitèrent les contacts européens avec d'autres continents, autorisant la cartographie de territoires nouveaux grâce à la navigation astronomique. Parallèlement, les coordonnées d'un nombre croissant de villes extra-européennes furent déterminées, enrichissant les cartes en précision et en étendue [7]. Initialement dominée par les cartographes portugais, espagnols et

italiens, cette production s'étendit, dès la seconde moitié du XVI^e siècle, aux éditeurs flamands et amstellodamois. Ainsi, Ortelius et Blaeu publièrent des atlas somptueux d'Europe et du monde, composés de cartes générales à petite échelle. Simultanément, la cartographie foncière et cadastrale prospéra, comme en attestent les archives : les planches les plus détaillées y figurent, révélant un intérêt persistant pour les grandes propriétés. Rystedt [8] illustre magistralement ce phénomène à travers les archives cadastrales suédoises, éclairant l'évolution cartographique d'un village. Ces documents, riches en détails, conservent une valeur heuristique pour les recherches contemporaines, notamment généalogiques : descendants d'émigrants vers les États-Unis y recouvrent les traces ancestrales. Les cartes foncières, dites géométriques, alimentaient la production de cartes géographiques à plus petite échelle ; les plans de remparts et de villes, conservés dans les archives municipales et cadastrales, documentent les reconstructions successives, éclairant le développement urbain des communes.

I-3. Définition de la carte géotechnique

La géotechnique regroupe l'ensemble des connaissances relatives aux propriétés physiques et mécaniques des sols et des roches, ainsi qu'à leur comportement face aux contraintes exercées par les phénomènes naturels ou par les activités humaines [3]. Les contraintes naturelles incluent notamment la gravité, les précipitations, l'érosion et les mouvements de terrain, tandis que les contraintes anthropiques regroupent l'urbanisation, l'implantation d'infrastructures, l'exploitation agricole ou minière, et toute intervention modifiant l'équilibre naturel des sols. La géotechnique consiste en l'intégration des données issues de la mécanique des sols et de la géologie appliquée à l'ingénierie [9].

Cette approche vise à anticiper, comprendre et maîtriser le comportement des terrains, afin de garantir la stabilité, la sécurité et la durabilité des ouvrages de construction et des aménagements territoriaux. L'objectif fondamental est de transformer des informations scientifiques complexes en outils pratiques permettant de planifier et d'exécuter des projets de manière sécurisée et efficace [10].

Une carte géotechnique constitue, dans ce cadre, un instrument graphique permettant la représentation visuelle et thématique des données géotechniques. Elle s'appuie sur les cartes géologiques existantes, mais elle est spécifiquement adaptée aux besoins des ingénieurs et techniciens. La carte fournit des informations essentielles sur la nature du sol et du sous-sol, les

caractéristiques mécaniques, la stabilité des pentes, la présence de nappes phréatiques, ainsi que les risques liés aux mouvements de terrain ou à l'érosion.

Mais, l'intérêt fondamental de la carte géotechnique réside dans sa capacité à synthétiser un grand nombre de données issues de sources diverses, telles que les forages, sondages, analyses en laboratoire et relevés géophysiques. Elle permet ainsi d'identifier les zones favorables ou défavorables à la construction, de prévoir les risques, d'optimiser le dimensionnement des fondations et de fournir un support fiable aux ingénieurs, urbanistes et décideurs territoriaux en matière de décision.

En somme, la carte géotechnique joue un rôle stratégique et opérationnel, servant de lien entre la science fondamentale des sols et les applications pratiques en ingénierie, en urbanisme et aménagement du territoire. Elle constitue un outil incontournable pour la planification sécurisée, la prévention des risques et la gestion durable des ressources naturelles.

I-4. Contenus de la carte géotechnique

Une carte géotechnique est une carte thématique spécialisée, dérivée de la carte géologique, mais spécifiquement conçue pour répondre aux besoins pratiques des ingénieurs, urbanistes et techniciens du domaine de la construction et de l'aménagement du territoire. Elle se distingue de la carte géologique classique par son orientation appliquée. Elle contribue à la description scientifique des formations et fournit des informations directement exploitables pour la planification et la réalisation des projets.

Cette carte fournit des informations essentielles sur le terrain et ses caractéristiques, permettant :

- **La conception et le dimensionnement des fondations et ouvrages de génie civil** : les données sur la nature du sol, sa résistance, sa compressibilité et son comportement face aux charges permettent de déterminer le type et la profondeur des fondations nécessaires, ainsi que les méthodes constructives appropriées.
- **L'évaluation de la stabilité des pentes et de la résistance des sols** : en analysant les propriétés mécaniques et géologiques des terrains, la carte permet d'identifier les zones potentiellement instables, les risques de glissements ou de tassements, et de prévoir les mesures de stabilisation ou de renforcement adaptées.

- **La prévention des risques liés aux mouvements de terrain, à l'érosion ou aux tassements** : elle offre un outil de prévention efficace, permettant d'anticiper les problèmes géotechniques, de planifier des interventions correctives et de minimiser les impacts sur les infrastructures et les populations.

Comparativement à la carte géologique ayant pour rôle principale l'analyse scientifique des formations géologiques, la carte géotechnique adopte à la fois une démarche pragmatique et synthétique. Elle simplifie l'information complexe en mettant en évidence les facteurs les plus pertinents pour les applications techniques et l'aménagement du territoire, tout en combinant des données de différentes disciplines telle que de la géologie, de l'hydrogéologie, de la géomorphologie et de la mécanique des sols.

La carte géotechnique constitue un outil stratégique pour les professionnels de l'ingénierie et de l'urbanisme et de la construction. Elle facilite la prise de décisions et la planification sécurisée des projets d'infrastructure et d'aménagement de l'espace.

I-4-1. Contenu typique d'une carte géotechnique

La carte géotechnique n'a pas qu'un rôle de représentation graphique des données isolées, mais elle peut combiner plusieurs facteurs essentiels permettant de comprendre le comportement du sol et du sous-sol dans une région donnée. Ces informations sont indispensables pour la planification, la conception et la prévention des risques liés aux infrastructures et à l'aménagement du territoire [11].

- **Lithologie**

La lithologie renseigne la structure des formations géologiques, elle décrit la nature des roches et des sols présents dans la zone étudiée. Elle inclut les roches sédimentaires, métamorphiques ou volcaniques, leur âge géologique, ainsi que l'épaisseur, l'orientation et la succession des couches géologiques. La carte indique également la présence éventuelle de failles, fractures ou discontinuités, ainsi que la disposition et l'orientation des strates. Ces informations sont cruciales pour déterminer la résistance des sols et la stabilité des terrains, et identifier par conséquent les zones susceptibles de mouvements de masse ou des tassements importants.

- **Hydrogéologie**

La cartographie géotechnique prend en compte les eaux souterraines et leur comportement. Les conditions hydrogéologiques sont un facteur déterminant pour l'ingénierie civile et la prévention des risques. Elle inclut :

- La localisation des nappes phréatiques et des aquifères,
- La perméabilité des sols et des roches,
- Les variations saisonnières du niveau de l'eau,
- La direction et la vitesse des écoulements souterrains.

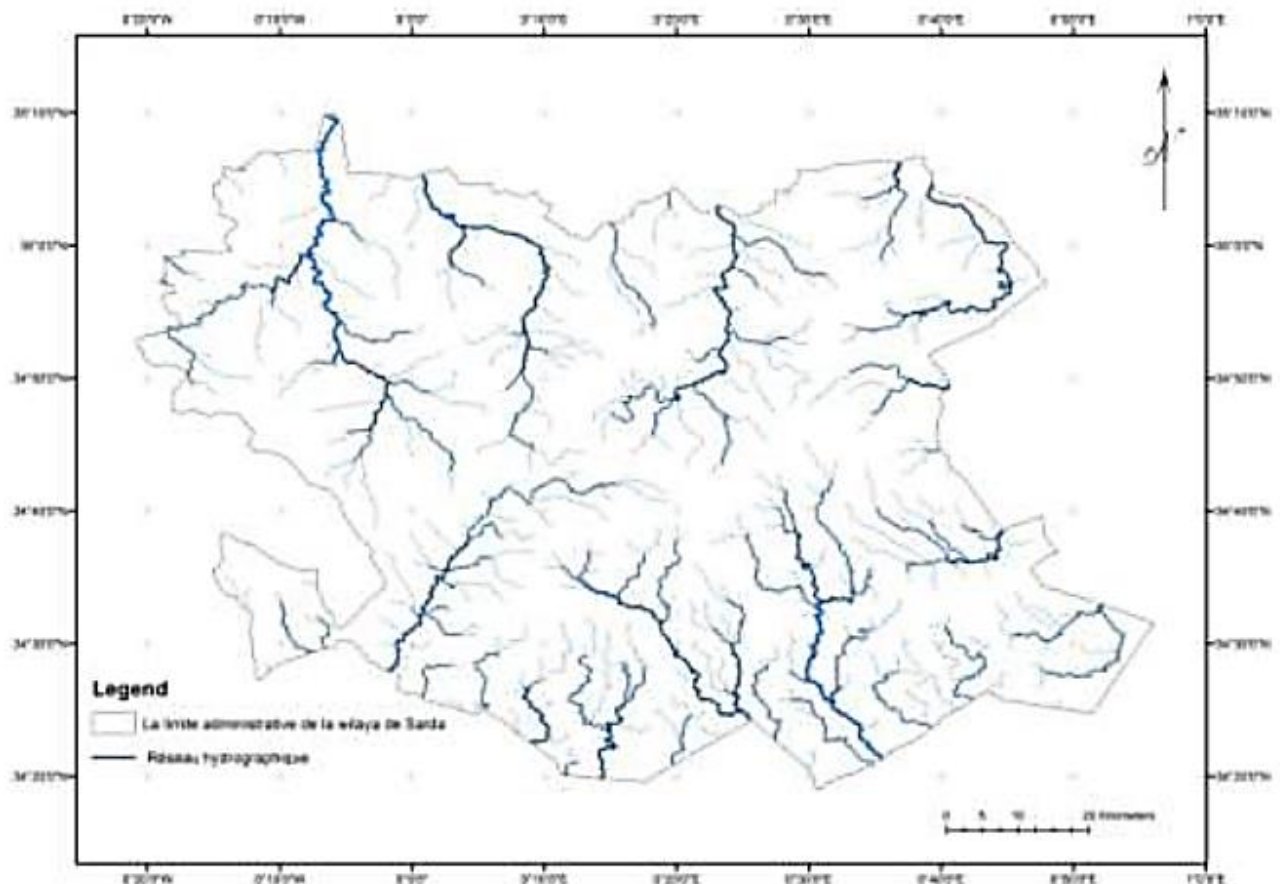


Figure 1: Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Saida [12].

Ces informations permettent de prévoir les risques liés à la saturation du sol, à l'érosion ou aux inondations, et de concevoir des systèmes de drainage ou de renforcement adaptés.

- **Caractéristiques géomorphologiques**

Les caractéristiques géomorphologiques concernent la configuration générale du relief et les formes topographiques ainsi que leur formation dans une région donnée, telles que la

topographie c'est-à-dire les formes topographiques récurrentes (les vallées, les collines, les pentes et les versants).

Figure 2: Carte géologique du bassin versant de Saïda (In Mansour. H, 2012). [13].

- La stabilité des terrains, notamment les zones à fortes pentes susceptibles de glissements,
- Le drainage des eaux de surface, qui peut provoquer des érosions ou des affaissements suite à l'infiltration et aux ruissellements surfaciques des eaux.
- La planification des infrastructures en fonction des contraintes naturelles.

- **Phénomènes géodynamiques**

Les phénomènes géodynamiques regroupent les processus naturels susceptibles de modifier la structure et la forme du terrain. Cela inclut :

- L'érosion et la sédimentation,
- Les glissements de terrain et les effondrements,
- Les mouvements sismiques ou parfois l'activité volcanique.

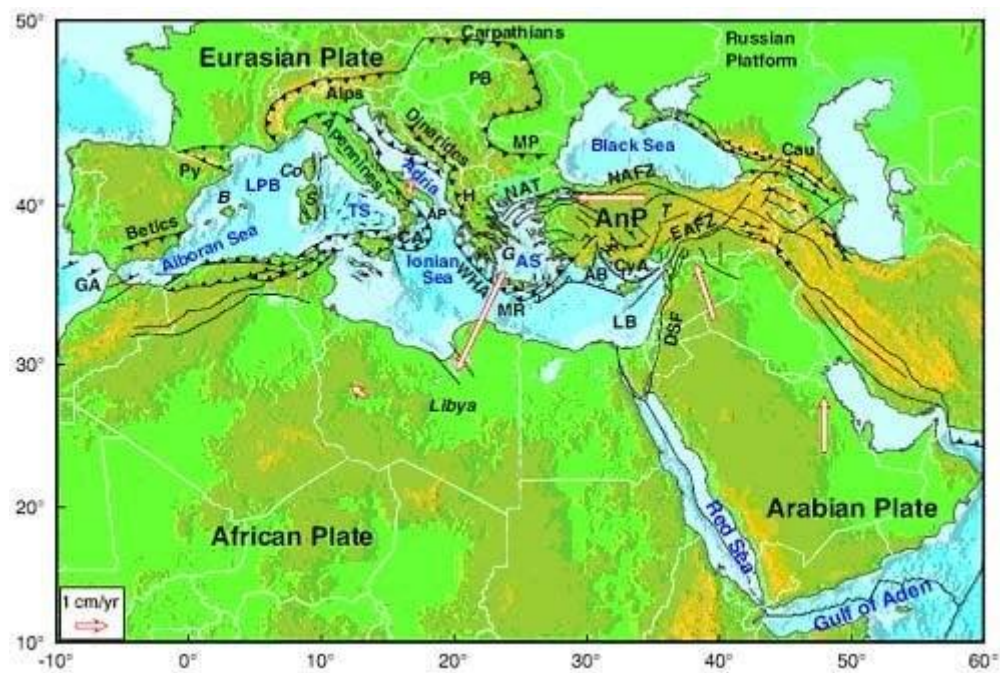


Figure 3: Carte géodynamique simplifiée de la Méditerranée orientale avec les failles majeures et les vecteurs de déplacement relatifs à l'Eurasie [14].

Ces phénomènes peuvent affecter directement la sécurité et la durabilité des infrastructures, et doivent être pris en compte dans toute planification ou construction. La carte géotechnique fournit ainsi un cadre permettant de prévenir les risques naturels et d'optimiser la conception des ouvrages en fonction des contraintes du site.

I-5. Classification des cartes géotechniques

La cartographie géotechnique compile sur une grande diversité d'informations selon les objectifs escomptés. Pour une meilleure organisation et exploitation, les cartes géotechniques nécessitent un classement. Les cartes géotechniques peuvent être classées selon trois critères principaux : l'usage, le contenu et l'échelle. Cette classification permet de mieux comprendre

la finalité de chaque type de carte et d'adapter les outils géotechniques aux besoins spécifiques des projets d'aménagement et d'ingénierie. Elle permet aux ingénieurs, urbanistes et décideurs de choisir le type de carte le plus adapté à leurs besoins, tout en facilitant l'interprétation des données.

I-5-1. Classification selon l'usage

Selon leur finalité, les cartes géotechniques se divisent généralement en deux grandes catégories :

- **Cartes à usage particulier**

Ce type de cartes mettent l'accent sur un aspect spécifique de la géologie appliquée à l'ingénierie. Elles sont conçues pour répondre à un besoin précis, par exemple l'analyse de la stabilité d'une pente ou l'étude d'un site pour la construction d'une infrastructure particulière. Ce type de carte permet une évaluation à la fois ciblée et approfondie, essentielle pour les projets nécessitant une connaissance détaillée d'un facteur géotechnique précis.

- **Cartes à usages multiples**

Ces cartes fournissent un ensemble d'informations géotechniques permettant d'évaluer simultanément plusieurs facteurs du terrain. Elles sont particulièrement utiles pour des applications variées, comme la planification urbaine, la construction d'infrastructures ou la prévention des risques naturels. Les cartes à usages multiples offrent une vision globale et intégrée du sous-sol, facilitant la prise de décision et la coordination entre différents intervenants technique dans un projet urbain.

I-5-2. Classification selon le contenu

Les cartes géotechniques sont également classées en fonction leur contenu, c'est-à-dire la nature des informations qu'elles visualisent. On distingue principalement :

- **Cartes analytiques (cartes de facteurs)**

Les cartes analytiques mettent en évidence la distribution spatiale d'un facteur géotechnique particulier. Elles sont recommandées pour une analyse détaillée et quantitative de certaines caractéristiques du sol ou du sous-sol.

- **Cartes synthétiques (cartes d'aptitudes)**

Elles sont appelées également les cartes d'aptitudes car elles évaluent la capacité du terrain à supporter différents types d'aménagements, par exemple la construction de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil. Elles regroupent et interprètent plusieurs types de données géologiques et géotechniques pour fournir une vision globale et intégrée du terrain, ce sont des cartes de synthèse géotechnique. Elles sont particulièrement utiles pour les projets nécessitant une compréhension multidimensionnelle du site étudié [15].

I-5-3. Classification Selon l'échelle

L'échelle d'une carte détermine le niveau de détail et la précision des informations représentées [3].

- **Cartes à grande échelle**

Ces cartes couvrent de petites surfaces avec un niveau de détail élevé (supérieur à 1/10 000). Elles permettent d'analyser précisément les caractéristiques locales du terrain, comme les pentes, les fractures rocheuses ou la localisation exacte des nappes phréatiques. Elles sont particulièrement utiles pour la conception des infrastructures ou l'étude de zones spécifiques à risque. A l'échelle 1/5 000, les détails fins sur les niveaux piézométriques, zones saturées, perméabilités locales et interactions avec les infrastructures, adaptée aux projets de génie civil et aux études géotechniques détaillées.

- **Cartes à moyenne échelle**

L'échelle pour ce type de cartes se situe entre 1/10 000 et 1/100 000, offrent un compromis entre détail et couverture du territoire. Elles sont utilisées pour l'aménagement régional et la planification des infrastructures, permettant de visualiser à la fois les zones stables et les zones à risque tout en intégrant plusieurs types de données géotechniques. Par exemple au 1/25 000 c'est représentation plus précise de la

forme du toit de la nappe et des directions d'écoulement, adaptée à la planification urbaine et aux études d'impact environnemental.

- **Cartes à petite échelle**

Ces cartes couvrent de grandes surfaces avec peu de détails (inférieures à 1/100 000). Elles sont adaptées à l'analyse stratégique à l'échelle nationale ou régionale, pour identifier les grandes tendances géotechniques et planifier la gestion des risques naturels à long terme. C'est une simplification des symboles et représentation générale des nappes et des zones hydrologiques, adaptée à une vue d'ensemble régionale.

Le choix de l'échelle dépend donc des objectifs du projet, de la précision nécessaire et de la superficie à couvrir [3].

I-5-4. Les cartes auxiliaires

Les cartes auxiliaires viennent en complément aux cartes géotechniques principales, elles sont souvent utilisées par ce qu'elles fournissent des informations spécifiques nécessaires à l'interprétation des données. Ce type de cartes joue un rôle de support pour assurer la fiabilité et la précision des analyses.

Parmi les éléments représentés sur ces cartes :

- **Localisation des sondages :**

Elles indiquent l'emplacement exact des forages et des investigations sur le terrain, essentiel pour comprendre la distribution spatiale des données.

- **Points de prélèvements d'échantillons :**

Elles montrent où ont été prélevés les échantillons de sol ou de roche, servant à des analyses en laboratoire pour déterminer les propriétés mécaniques et hydrogéologiques.

- **Essais géotechniques réalisés sur le terrain :**

Elles présentent les tests in situ tels que la pénétration dynamique ou la mesure de la compacité du sol, apportant des informations sur la stabilité et la portance du terrain.

Les cartes auxiliaires complètent donc les cartes analytiques ou synthétiques en fournissant un niveau de détail supplémentaire, indispensable pour la planification des projets et la prise de décision.

I-6. Exemples de cartes géotechniques

Les cartes géotechniques constituent des outils essentiels pour visualiser et analyser les propriétés des sols et du sous-sol, ainsi que pour identifier les risques potentiels liés à l'aménagement du territoire et aux projets de construction. Elles permettent de synthétiser un grand nombre de données techniques en représentations visuelles claires, facilitant la prise de décision pour les ingénieurs, urbanistes et décideurs. Parmi les exemples les plus courants :

I-6-1. Carte de stabilité des sols

La carte de stabilité des sols a pour objectif principal d'identifier, localiser et classifier les zones selon leur degré de stabilité ou d'instabilité.

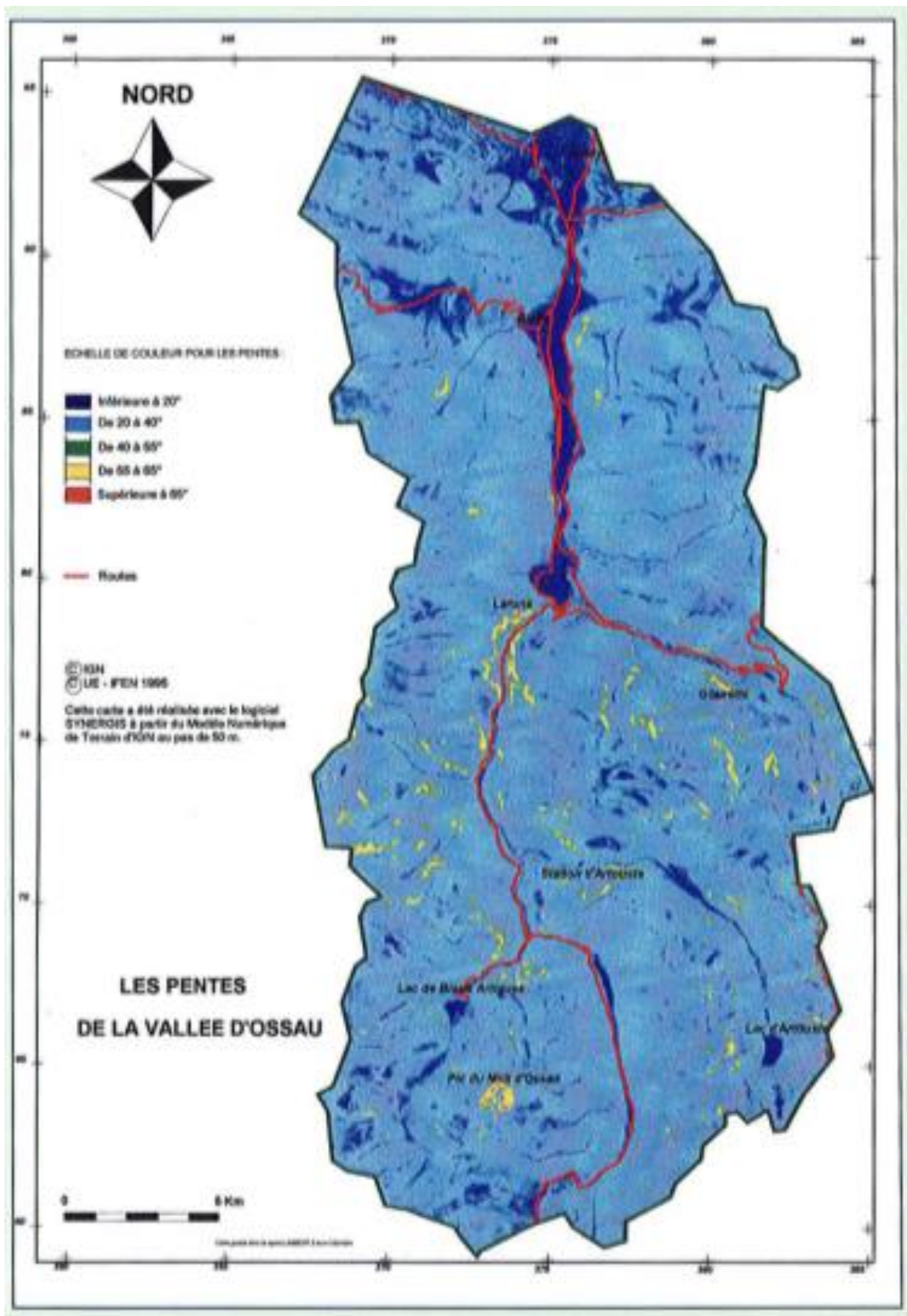


Figure 4: Carte des pentes, la vallée d'Ossau, Pyrénées-Atlantiques, 2000 [16].

Elle repose sur l'analyse combinée de plusieurs facteurs géotechniques et environnementaux, tels que la pente, la nature du sol, la couverture végétale, la présence d'eau souterraine et les phénomènes d'érosion. Cette classification permet de prévoir les zones à risque et de planifier les mesures préventives adaptées. Elles représentent des inclinaisons du terrain, utile pour identifier les zones à risque d'érosion ou de glissement (figure 4).

La figure (fig.5) présente une carte de répartition de l'angle de frottement du sol obtenue par interpolation (krigeage). Les différentes couleurs représentent les variations spatiales de cette propriété mécanique : les valeurs élevées indiquent un sol plus résistant et plus stable, tandis que les valeurs faibles correspondent à un sol moins résistant. Cette carte est utilisée pour évaluer la stabilité et la capacité portante du terrain et constitue un outil d'aide à la décision dans les projets d'aménagement.

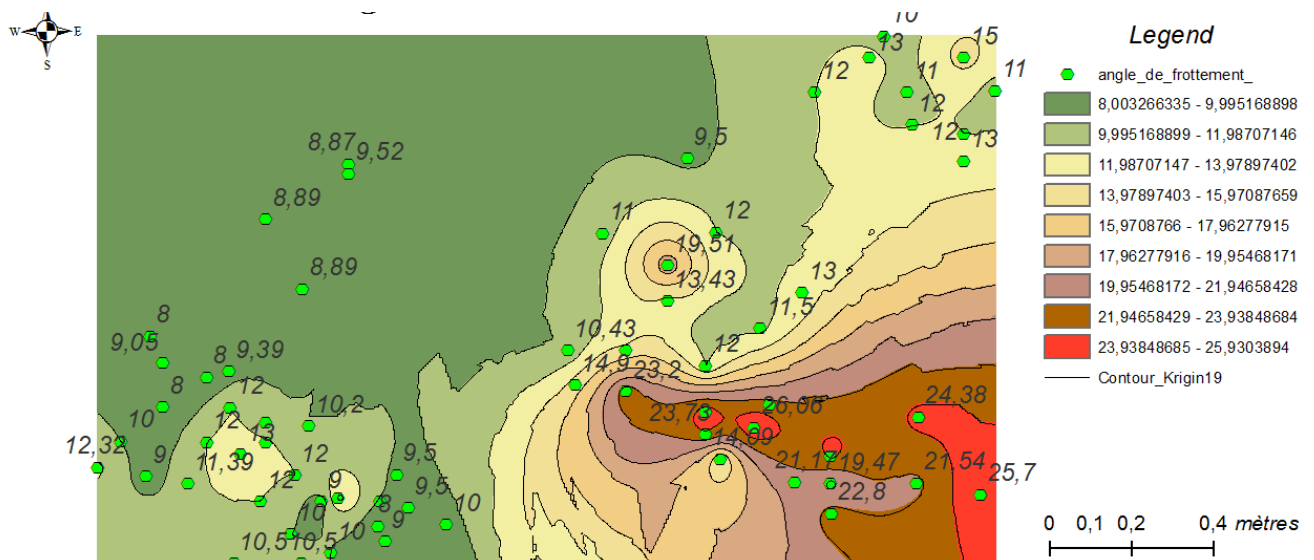


Figure 5 : Carte isovaleur d'angle de frottement ϕ° , Commune de Azazga (Algérie) [17].

a. Classification des zones de stabilité

La carte de stabilité distingue généralement plusieurs catégories de terrains, facilitant l'orientation des décisions d'aménagement et la conception des infrastructures :

- **Zones stables**

Ce sont des terrains présentant une faible susceptibilité aux glissements ou affaissements, avec une structure cohérente et une bonne résistance mécanique. Ils sont généralement adaptés à la construction sans nécessiter de mesures correctives importantes.

- **Zones moyennement stables**

Ces terrains présentent certaines contraintes géotechniques, comme des pentes modérées ou des sols sensibles à l'érosion. La réalisation de projets d'infrastructure dans ces zones nécessite des études complémentaires et éventuellement des mesures de stabilisation.

- **Zones instables**

Ce sont les terrains à risque élevé, caractérisés par des pentes raides, des sols peu cohésifs, ou une exposition à des phénomènes naturels tels que l'érosion ou les mouvements de terrain. Les constructions dans ces zones exigent des mesures de protection rigoureuses ou doivent être évitées.

b. Exemple

Les glissements de terrain représentent l'un des principaux risques pris en compte par la carte de stabilité des sols. Ils se définissent comme le déplacement d'une masse de sol ou de roche le long d'une surface de rupture par cisaillement, pouvant endommager gravement les infrastructures et menacer la sécurité des populations.

L'utilisation d'une carte de stabilité permet de prévenir les catastrophes naturelles, d'orienter le choix des sites de construction et de planifier des mesures correctives telles que le drainage, le reboisement ou la stabilisation des pentes. Ainsi, elle constitue un outil clé pour garantir **la sécurité**, la durabilité et la viabilité des projets d'urbanisme.

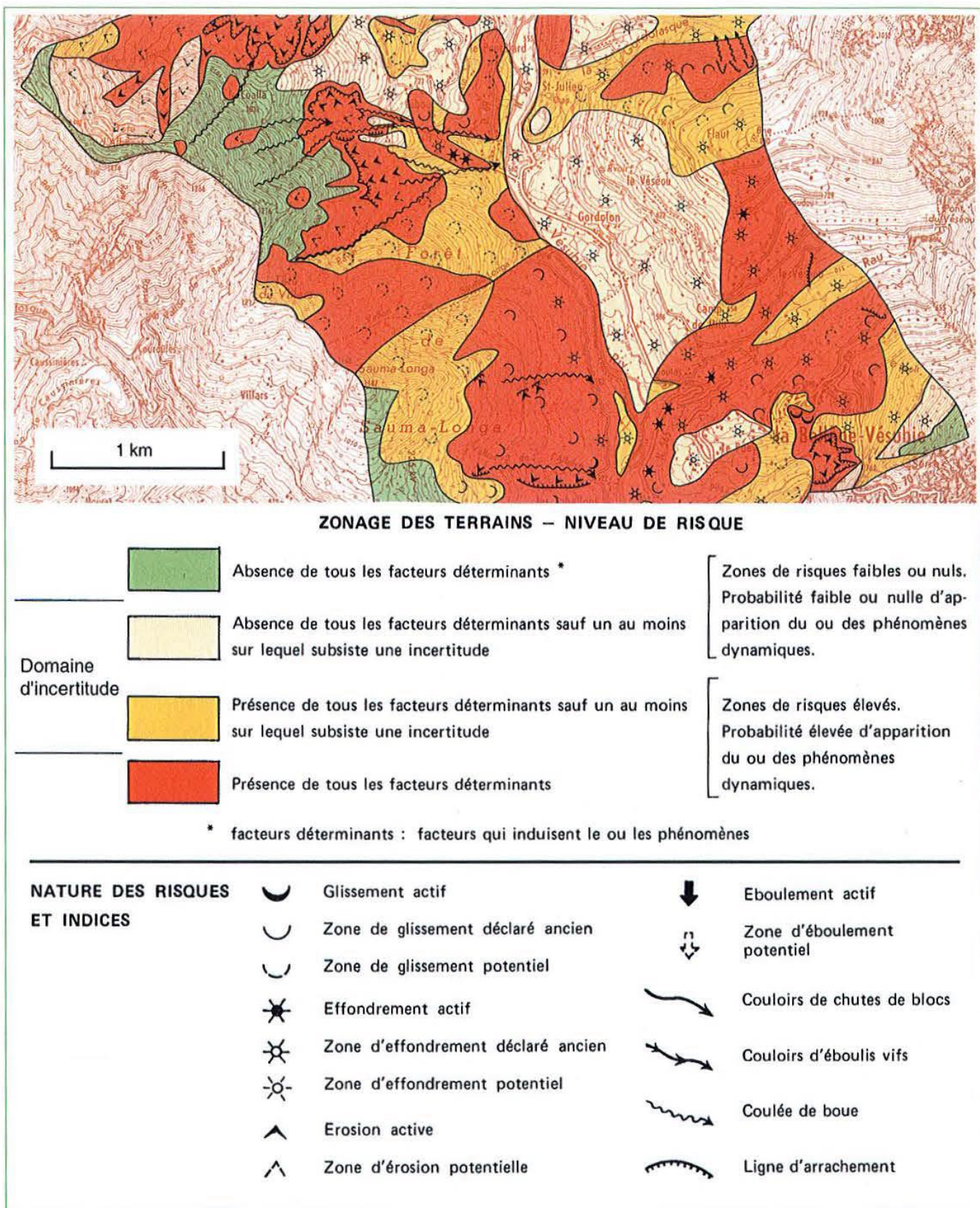


Figure 6: Carte ZERMOS de la moyenne Vésubie, à l'échelle 1/25 000 : légende et extrait de carte, levés de MM. Calvino et Méneroud [16].

I-6-2. Carte des risques géotechniques

La carte des risques géotechniques constitue un outil fondamental pour identifier les zones exposées à différents dangers liés aux propriétés du sol et à l'activité géologique. Elle synthétise les informations provenant de diverses investigations géotechniques, géologiques et géophysiques, afin de fournir une vision globale des vulnérabilités du territoire. Ces cartes sont essentielles pour la planification urbaine, la sécurité des infrastructures et la protection des populations. Ces cartes sont indispensables pour anticiper les contraintes mécaniques, hydrauliques et environnementales du terrain.

a- Types de risques représentés

Les cartes des risques géotechniques couvrent un large éventail de dangers naturels ou induits par l'activité humaine :

- **Glissements de terrain, affaissements et tassements**
 - Ces phénomènes correspondent au déplacement ou à la déformation des sols et des roches sous l'effet de la gravité, de la saturation en eau ou de contraintes mécaniques. Ils représentent une menace directe pour les infrastructures et la sécurité des populations.

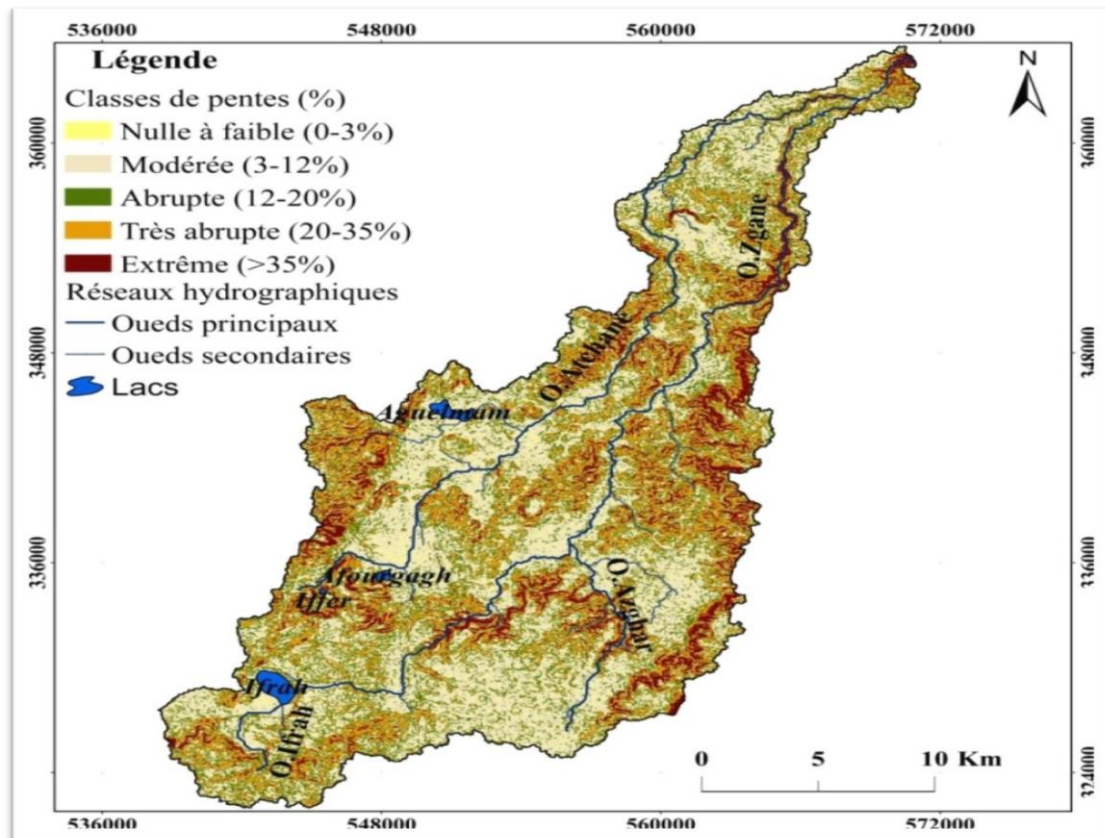


Figure 7 : Carte des zones vulnérables à l'érosion hydrique, Bassin versant l'Oued Zgane. (H. OUSMANA et al, 2017) [18].

- **Érosion et sédimentation**

La dégradation progressive des sols et le transport de matériaux peuvent modifier la topographie, affecter les fondations et entraîner l'obstruction des réseaux hydrauliques, augmentant ainsi le risque d'inondation et de déstabilisation des pentes.

- **Risques liés à l'activité géodynamique interne**

Il s'agit des phénomènes naturels tels que la sismicité, le volcanisme ou la présence de failles actives, qui peuvent provoquer des mouvements de terrain, des fissurations ou des effondrements, et nécessitent une vigilance particulière dans l'aménagement du territoire.

L'importance et l'utilisation des cartes des risques géotechniques résident dans leur rôle informatif et comme outil indispensable aidant les pouvoirs publics, les urbanistes et les ingénieurs dans la prise de décision, car elles permettent :

- De déterminer les zones à risque élevé, où la construction doit être interdite ou strictement régulée.
- De planifier des mesures de prévention, telles que le drainage, la stabilisation des pentes ou le renforcement des fondations.
- D'informer les populations et les décideurs sur les dangers potentiels, contribuant ainsi à une meilleure préparation face aux catastrophes naturelles.
- D'intégrer la gestion des risques dans la planification territoriale, assurant la sécurité des infrastructures et la durabilité des aménagements.

b- Cadre réglementaire

Pour être fiables et efficaces, les cartes des risques géotechniques doivent :

- Reposer sur des **données scientifiques solides et validées**, issues d'investigations de terrain, d'analyses de laboratoire et de relevés géophysiques.
- Respecter les **normes et réglementations en vigueur**, garantissant que les informations sont juridiquement pertinentes et utilisables dans le cadre de décisions officielles.
- Être **actualisées régulièrement**, afin de prendre en compte les changements environnementaux, les nouvelles infrastructures et les évolutions des phénomènes géodynamiques.

En résumé, ces cartes constituent un **outil stratégique indispensable** pour la prévention des risques, la sécurité des populations et la gestion durable du territoire.

c- Le zonage géotechnique :

Le zonage géotechnique identifie et regroupe les terrains présentant des caractéristiques similaires, facilitant l'aménagement et la gestion des infrastructures.

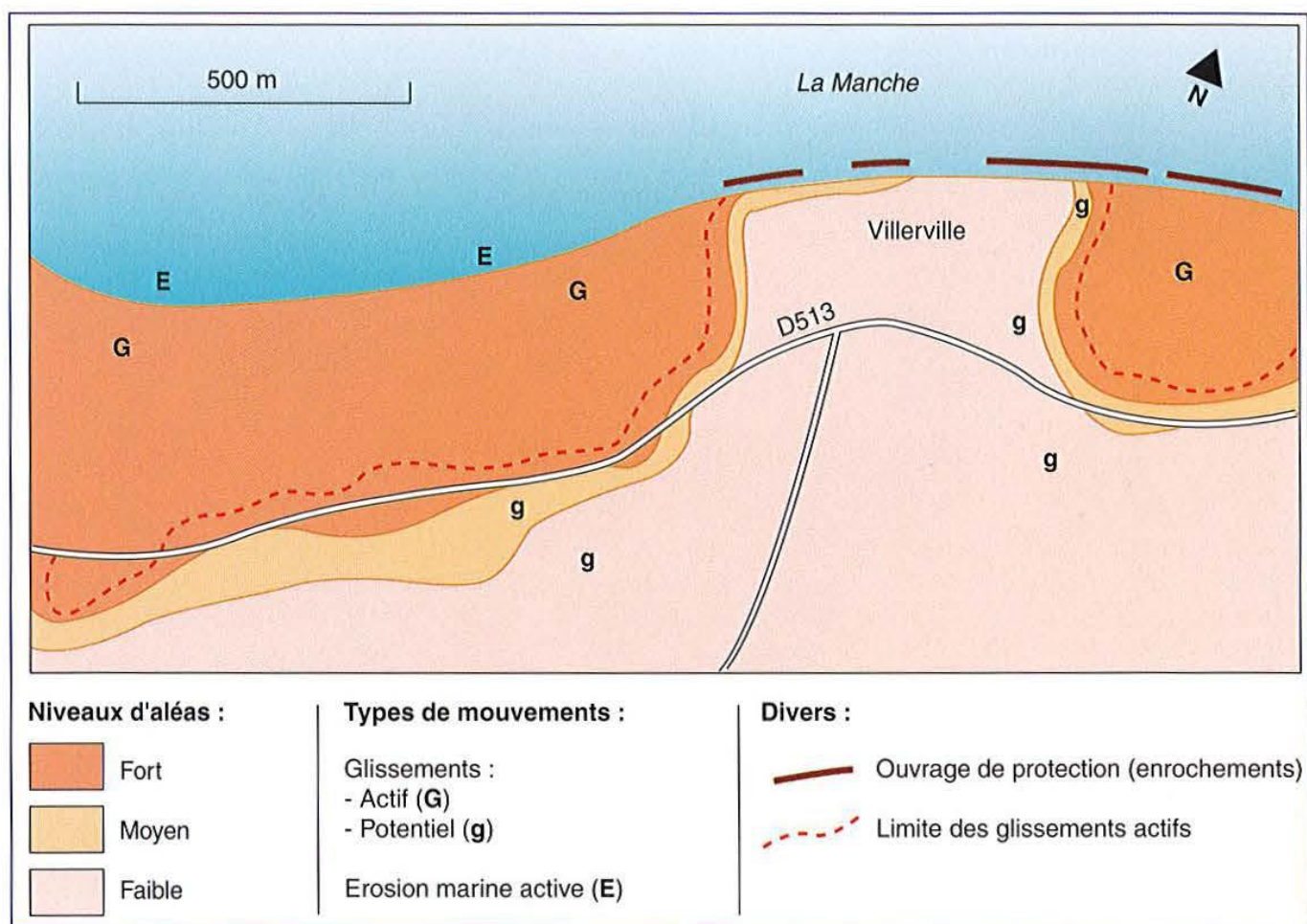


Figure 8 : Zonage d'aléa prenant en compte la possibilité d'extension vers l'amont des glissements actifs dans le Calvados [16].

I-6-3. Complémentarité des cartes de stabilité et des risques géotechniques

Les cartes de stabilité des sols et les cartes des risques géotechniques sont des outils complémentaires qui jouent un rôle central dans la planification et la gestion des territoires. Cette combinaison permet :

- D'identifier les zones stables et instables du point de vue mécanique et géologique, offrant une vue précise des terrains adaptés ou non à la construction.
- De prévenir les risques liés aux mouvements de terrain, en fournissant des informations sur les zones sujettes aux glissements, affaissements, tassements ou érosion.

- De faciliter la planification et l'implantation des infrastructures, en orientant les décisions sur le choix des sites, le dimensionnement des fondations et les techniques constructives adaptées.

Ces cartes s'inscrivent dans le cadre des concepts fondamentaux de la mécanique des sols, et constituent un pilier essentiel de la géotechnique moderne. Elles permettent de transformer des connaissances scientifiques complexes en outils pratiques pour les ingénieurs, urbanistes et décideurs, tout en assurant la sécurité des populations et la durabilité des infrastructures [10].

Conclusion

Les cartes géotechniques sont des outils de travail indispensables dans des domaines d'application divers. En ingénierie civile, elles orientent le choix des sites d'implantation de projet d'urbanisme et de construction tout en indiquant les recommandations appropriées en matière de systèmes de fondation, de dimensionnement et de conception d'ouvrages spécifiquement adaptés aux contraintes du sol [19]. En matière d'urbanisme et de la planification territoriale, elles permettent l'identification des zones favorables ou à risques, favorisant ainsi une optimisation raisonnée de l'occupation des sols [20]. Tout comme elles contribuent à la gestion des risques naturels en prévenant les glissements de terrain, les affaissements, les failles, l'érosion ou les inondations. Les cartes géotechniques synthétisent et interprètent de manière claire et précise l'ensemble des informations relatives au sol et au sous-sol. En intégrant diverses sources de données — analyses géologiques, mesures in situ, essais de laboratoire et techniques géophysiques —, elles procurent une vision intégrée et exhaustive du sous-sol, essentielle à la prise de décisions éclairées en matière de sécurité, de durabilité et de développement harmonieux du territoire [21]. Elles permettent ainsi de concilier sécurité, durabilité et développement harmonieux du territoire, en transformant des données scientifiques complexes en décisions pratiques, tout en protégeant les populations et l'environnement. Parmi les bénéfices majeurs des cartes géotechniques figurent, en premier lieu, la sécurité des populations, assurée par l'identification précoce des zones à risque et la prévention des accidents induits par les glissements de terrain, les affaissements ou les inondations. La prévention des risques naturels s'en trouve renforcée par une planification et une mise en œuvre de mesures préventives visant à limiter l'impact des phénomènes géodynamiques [22]. Enfin, les cartes géotechniques optimisent les coûts et l'usage des matériaux en adaptant les techniques de construction et en réduisant les interventions correctives, le tout fondé sur une connaissance approfondie du sol [29]. Elles représentent ainsi un outil incontournable pour les ingénieurs,

urbanistes et décideurs, garantissant une planification sécurisée et efficace des infrastructures et du territoire.

Chapitre II : Méthodologie d'élaboration des cartes géotechniques

II.1. Introduction

L'élaboration de cartes géotechniques constitue une étape cruciale dans la compréhension et la gestion des paramètres physiques et mécaniques du sous-sol à des fins d'aménagement du territoire. Les données recueillies sont ensuite présentées sous forme de cartes géotechniques et de rapports détaillés, qui peuvent être utilisés non seulement par des spécialistes de la géotechnique, mais également par les planificateurs, ingénieurs civils et décideurs n'ayant pas une expertise technique approfondie dans ce domaine. Ces informations sont essentielles pour planifier le développement urbain, les infrastructures, ainsi que pour prévenir et gérer les risques naturels tels que les glissements de terrain, les inondations et l'érosion. L'objectif principal des études géotechniques sur un territoire donné est de fournir aux pouvoirs publics et aux décideurs responsables de l'aménagement du territoire des informations précises et fiables sur les caractéristiques physiques, mécanique et structurales des sols et des formations rocheuses. Ce chapitre présente de manière succincte le cadre général de la méthodologie d'élaboration des études géotechniques, [24] en soulignant l'importance de chaque étape.

II.2. Méthodologie de production des cartes géotechniques

La méthodologie d'élaboration repose sur une approche rigoureuse et multidisciplinaire, depuis le recueil des données variées, analyses approfondies et modélisation. Par ailleurs, l'actualisation régulière de ces cartes est un enjeu majeur, car le sous-sol est soumis à des évolutions naturelles et anthropiques qui peuvent modifier significativement ses propriétés au fil du temps. Les cartes et rapports sont des documents synthétiques clairs, leur élaboration nécessite une somme considérable de recherches et d'analyses, incluant [31] :

- Des travaux de terrain précis et méthodiques.
- Des essais en laboratoire sur les échantillons prélevés.
- Des interprétations rigoureuses des résultats obtenus.

En Algérie, la création d'une carte géotechnique à des fins d'aménagement urbain suit une méthodologie bien structurée, adaptée aux contraintes locales (sismicité RPA99/2003) et encadrée par le CGS Alger, l'ASGA et les normes AFNOR/Eurocode 7. Elle repose sur une

approche multidisciplinaire combinant géologie, SIG, et campagne de reconnaissance du sol (forages). Cette démarche est structurée en 5 phases itératives. Cette méthodologie garantit une échelle 1/5 000-1/25 000, intégrant microzonage sismique et POS, pour guider l'urbanisme résilient [17].

II.2.1. Recherches préalables et collecte des données

L'élaboration d'une carte géotechnique pour territoire donné, commence par une phase préparatoire et un recensement exhaustif de données de terrain et de laboratoire. Cette étape préalable est importante car elle permet de recueillir toutes les informations disponibles, de comprendre le contexte général du site, et de planifier efficacement les travaux futurs sur le terrain. Une bonne préparation garantit la précision des résultats et réduit les risques d'erreurs ou d'omissions lors des investigations.

Cette phase est structurée généralement en trois étapes principales : la collecte documentaire, l'analyse des données existantes et la planification des investigations à réaliser sur le terrain. Cette phase est la plus déterminante pour la qualité du produit final [26].

II.2.1.1. Collecte documentaire

La collecte documentaire constitue la première étape de l'étude géotechnique. Elle consiste à réunir et examiner toutes les informations disponibles relatives au site étudié. Ces documents peuvent inclure :

- **Cartes topographiques et géologiques** : elles permettent de visualiser la configuration du terrain, les formations géologiques principales (marnes Miocène, alluvions Quaternaires) et les structures rocheuses existantes (Cartes géologiques, échelle 1/50 000-1/200 000), l'historique sismique et plans d'urbanisme [24].
- **Photographies aériennes** : l'examen des photographies aériennes anciennes et récentes aide à identifier l'évolution du territoire, les zones d'érosion, les crues anciennes et les transformations des paysages. L'analyse des images satellites par des techniques d'analyse spatiales (télédétection) et modèles de terrain numérique (MNT) pour l'identification linéaments par exemple (failles) via photogéologie aérienne.

- **Rapports de sondages et études géotechniques antérieures** : ils fournissent des informations précieuses sur la nature du sol, les propriétés mécaniques et les éventuelles problématiques déjà rencontrées.
- **Données hydrologiques et environnementales** : la connaissance des nappes phréatiques, des écoulements d'eau et des zones humides est indispensable pour prévoir les risques et adapter les méthodes d'investigation.

Ces documents sont classés, vérifiés et évalués selon leur fiabilité et leur pertinence. L'objectif est de disposer d'une base documentaire, qui servira de référence pour toutes les étapes suivantes de l'étude.

II.2.1.2. Analyse des données existantes

Lors de cette étape, il est procédé à une analyse critique et scientifique des données existantes. Cette étape permet de :

- Identifier les zones à risques, comme les secteurs sujets aux glissements de terrain, aux inondations ou à l'érosion.
- Déterminer la cohérence des informations disponibles, en vérifiant que les données issues de différentes sources sont compatibles.
- Détecter les lacunes d'information, c'est-à-dire les secteurs ou aspects du terrain qui nécessitent des investigations supplémentaires.
- Formuler des hypothèses préliminaires sur la stratigraphie, la nature des sols et les propriétés mécaniques attendues.

Cette étape d'analyse constitue un préalable indispensable pour garantir la pertinence et l'efficacité des investigations de terrain. Elle permet également de gérer le temps et d'économiser les ressources, en ciblant précisément les zones nécessitant des relevés approfondis.

II.2.1.3. Planification des investigations

Cette étape de terrain est consacrée à des investigations géotechniques directes. Cette phase préparatoire consiste à planifier de manière détaillée les investigations sur le terrain. Cette planification comprend plusieurs aspects essentiels [27] :

- **Définition des zones prioritaires** : certaines régions, en raison de leur importance stratégique ou de risques potentiels, doivent être étudiées en priorité. L'objectif est de définir l'aire d'étude et l'établissement par exemple d'un zonage des risques identifiés : glissements, capacité portante des sols etc.
- **Détermination de la densité des points d'information** et de l'échelle des cartes à produire, afin de garantir une couverture complète du territoire et une précision suffisante pour chaque type d'étude. La campagne des forages géotechniques permet de prélever des échantillons de sols à différentes profondeurs. Ces sondages fournissent des informations directes sur la stratification, la texture, la composition minéralogique et la profondeur de la nappe phréatique. Le choix des emplacements de forage est stratégique et souvent guidé par une analyse préalable des données existantes. Pour un réseau dense urbain, il est préférable une couverture spatiale d'un (1) forage pour une surface de 1 000 à 5 000 m² et une profondeur de 10 à 30 m. Échantillonnage carotté.
- **Sélection des méthodes d'investigation adaptées**, telles que les forages, les essais in situ (pénétromètre, scissomètre) ou les levés géophysiques. Chaque méthode est choisie en fonction des objectifs et de la nature du terrain.
- **Organisation logistique des équipes et du matériel** nécessaire pour réaliser les travaux, en tenant compte de la sécurité, de l'accessibilité et des contraintes environnementales.

La planification détaillée constitue un guide opérationnel qui oriente toutes les activités de terrain, assure la collecte de données cohérentes et exploitables, et optimise l'utilisation des ressources disponibles.

II.3. Travaux de terrain

Les travaux sur le terrain constituent l'étape la plus concrète et essentielle de toute étude géotechnique. Leur objectif principal est de compléter et vérifier les informations recueillies lors des recherches préalables et de la collecte documentaire. Ces travaux permettent de mieux comprendre la stratigraphie des dépôts meubles, la profondeur du socle rocheux, les propriétés mécaniques des sols et la localisation des zones à risque telles que les inondations, l'érosion ou les glissements. Peter (1966) [28] souligne déjà l'importance des essais in situ pour la caractérisation directe des sols.

Les principaux types de travaux sur le terrain comprennent :

- Cartographie des dépôts de surface et du socle rocheux.
- Examen général de la région pour identifier les zones à risque.
- Prélèvements d'échantillons de surface pour caractériser les unités stratigraphiques.
- Levés géophysiques, essais in situ au pénétromètre et au scissomètre, ainsi que des sondages avec prélèvement d'échantillons.

II.3.1. Relevés géophysiques

Les **levés géophysiques** sont des investigations qui permettent d'obtenir **des informations indirectes mais essentielles sur le sous-sol** sans recourir immédiatement à des forages. Ils fournissent une vue d'ensemble de la **structure, de la profondeur et de la nature des dépôts**, ce qui aide à optimiser le plan de forage et à identifier les zones présentant des risques géotechniques.

Les principales méthodes de levés géophysiques utilisées sont :

- **Sismique réfraction**
- **Résistivité électrique**

Ces méthodes sont complémentaires et fournissent des données précises sur les différentes couches de sol et le socle rocheux.

II.3.1.1. Sismique réfraction

La **sismique réfraction** est une méthode basée sur la **propagation des ondes élastiques dans le sol**. Une charge artificielle (dynamite ou choc mécanique) est appliquée en un point, et les ondes créées sont enregistrées par des capteurs disposés à la surface.

Les informations obtenues permettent de :

- Déterminer les différentes **couches de sol** et leur épaisseur.
- Identifier la **profondeur et la topographie du socle rocheux**.
- Localiser les zones de **dangers géotechniques** éventuels.

Les appareils les plus utilisés sont le FS-3 et l'ABEM Trio 3.X à 12 canaux, qui offrent une grande précision dans la mesure de la vitesse de propagation des ondes et dans l'identification des interfaces entre les couches de sol.

II.3.1.2. Résistivité électrique

La **résistivité électrique** consiste à **injecter un courant électrique dans le sol via deux électrodes** et à **mesurer la différence de potentiel à d'autres électrodes**. Cette méthode permet de :

- Identifier les **types de sols et leur épaisseur**.
- Détecter les zones de **saturation en eau** ou de **variations de composition du sol**.

Les appareils couramment utilisés sont le **RUE-2** et le **RS-P-6**, qui permettent de **réaliser des mesures précises et continues sur toute la profondeur investiguée**.

II.3.2. Essais in situ.

Les essais in situ sont des investigations effectuées directement sur le terrain afin de mesurer les propriétés mécaniques des sols à leur emplacement naturel. Ces essais permettent d'obtenir des données précises sur la résistance à la pénétration, la cohésion et la sensibilité des sols, informations essentielles pour la conception des fondations et l'évaluation des risques géotechniques.

Parmi les principaux essais in situ, on distingue :

- Le **pénétromètre statique** ou dynamique pour mesurer la résistance à la pénétration.
- Le **scissomètre**.

Ces deux méthodes fournissent des mesures complémentaires qui aident à mieux comprendre le comportement réel des sols sous charge.

Tableau 1 : Essais géotechniques et paramètres mesurés. [01]

Essai	Paramètre mesuré	Norme algérienne
Pénétrométrie CPT	Résistance q_c , friction f_s	RPA99/ Eurocode 7
Pressiomètre Menard	Limite élastique PLT	NF P94-110
Bruit de fond MASW	Vitesse ondes V_s (sismique)	CGS Alger proto.
Sondes piézo CPTu	Pression interstitielle u	ASTM D5778

II.3.2.1. Pénétromètre

Le **pénétromètre statique** consiste à enfoncer une **pointe conique dans le sol à l'aide d'un vérin hydraulique** et à mesurer la résistance qu'oppose le sol à cette pénétration. Les paramètres principaux mesurés sont :

- **QC** : résistance à la pénétration de la pointe (kg/cm^2)
- **FS** : friction exercée par le sol sur le manchon situé au sommet de la pointe

Les caractéristiques du dispositif incluent :

- Pointe de 600 cm^2 pour le QC et manchon de 150 cm^2 pour la friction.
- Vitesse d'enfoncement constante de 2 cm/s .
- Lecture des valeurs tous les 20 cm de profondeur.

Cet essai permet de **classer les sols selon leur densité et leur rigidité**, et il est particulièrement utile pour les sols cohérents et fins. Il est cependant moins adapté aux sols très granulaires ou aux roches.

II.3.2.2. Scissomètre

Le **scissomètre** est un appareil permettant de mesurer la **résistance au cisaillement des sols non remaniés et remaniés**. Le dispositif est enfoncé dans le sol, et à un niveau donné, un système de palettes est tourné :

- **Rotation lente** : mesure de l'effort maximum nécessaire pour rompre le sol intact (**Rc**)
- **Rotation rapide après remaniement** : mesure de la résistance du sol remanié (**Rm**)

Le rapport **Rc/Rm** fournit la **sensibilité du sol**, qui est un indicateur de sa stabilité et de son comportement sous contraintes.

Les appareils les plus utilisés sont de marque **Géonor** et **Nilcon**, fiables et adaptés à divers types de sols.

Les résultats des essais au pénétromètre et au scissomètre permettent de :

- Identifier les zones de sols mous, moyens ou durs.
- Déterminer la répartition verticale des couches de sol.
- Fournir des informations critiques pour la conception des fondations et l'aménagement du terrain.

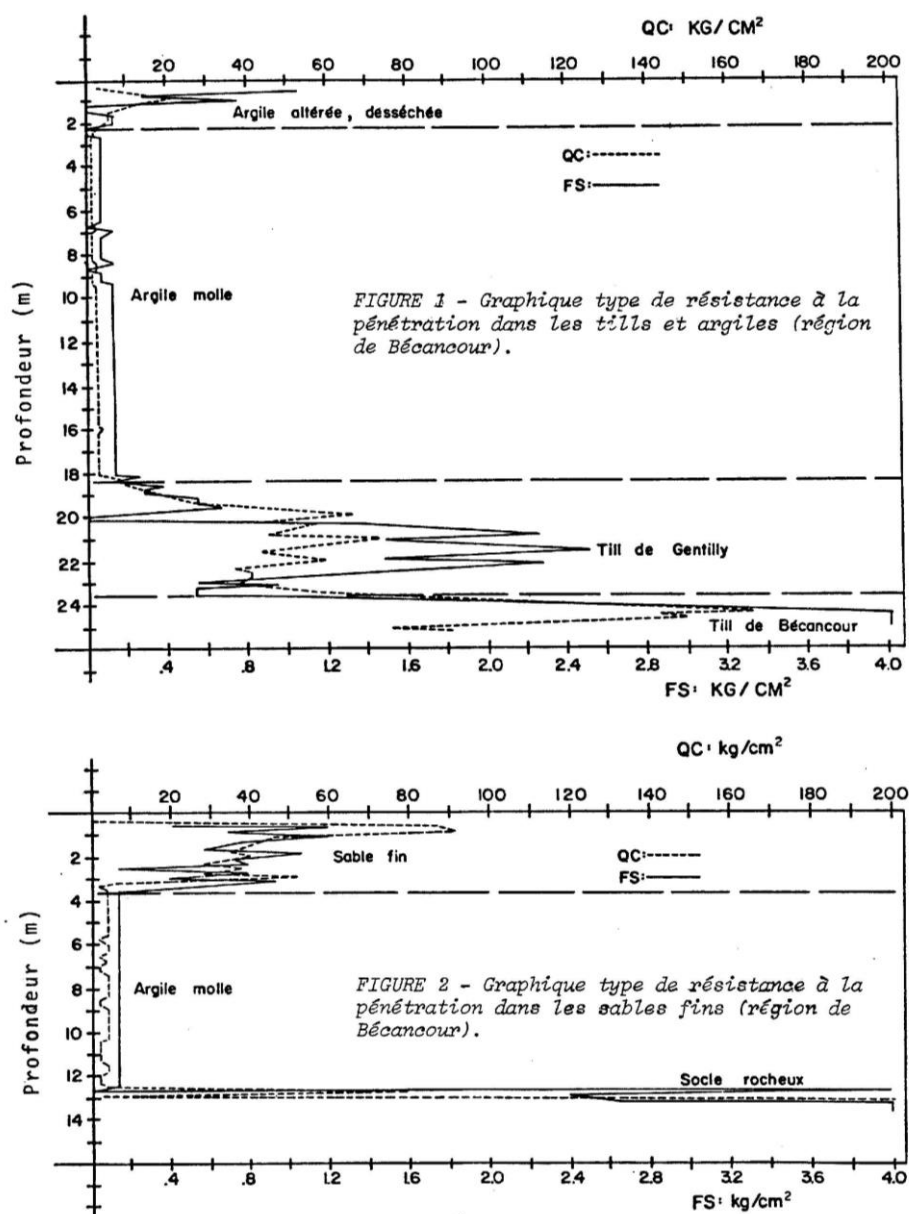


Figure 9 : Graphique de la résistance à la pénétration des sols (CPT) [22].

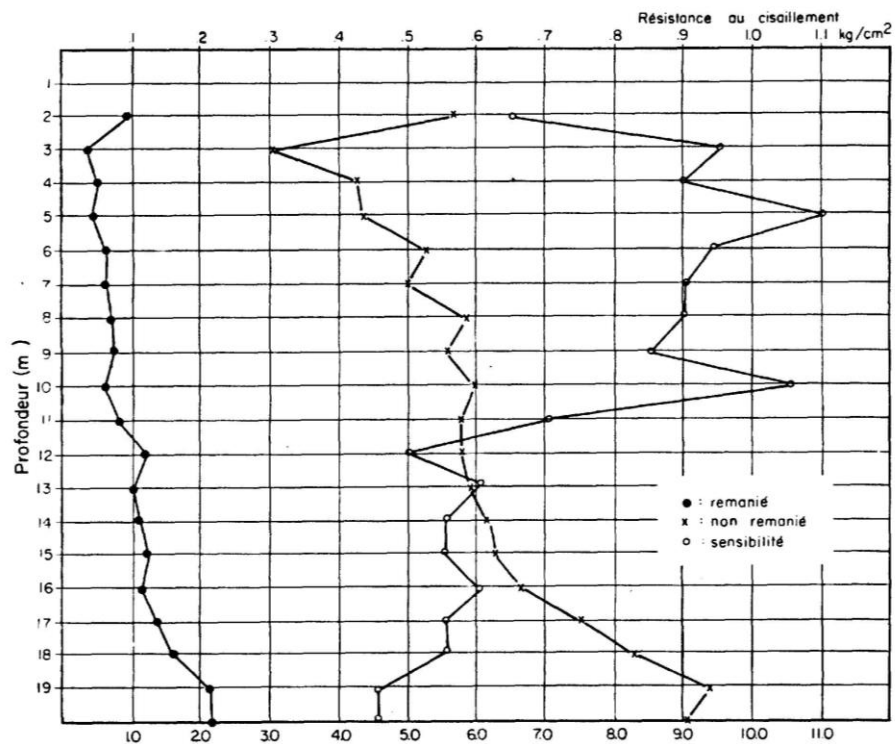


Figure 10 : Profil vertical de la résistance au cisaillement des sols » [10].

Tableau 2 : Classification des sols selon la résistance à la compression simple (Rc). [02]

Sols	Résistance (Rc en kg/cm ²)
Très mous	$R_c < 0,125$
Mous	$0,125 < R_c < 0,25$
Moyens	$0,25 < R_c < 0,5$
Raides (fermes)	$0,5 < R_c < 1,0$
Très raides (très fermes)	$1,0 < R_c < 2,0$
Durs	$R_c > 2,0$

II.3.3. Forages géotechniques

Les **forages géotechniques** constituent une étape essentielle des investigations sur le terrain. Ils permettent d'**obtenir des échantillons de sols et de roche à différentes profondeurs**, de déterminer la stratigraphie exacte du site et de compléter les données obtenues par les levés géophysiques et les essais in situ. Ces informations sont cruciales pour l'**évaluation de la portance du sol, la conception des fondations et la prévention des risques naturels**.

Les forages sont réalisés à l'aide de **foreuses hydrauliques mobiles** et peuvent être accompagnés de **prélèvements spécifiques selon la nature du sol**, afin d'assurer des analyses détaillées en laboratoire.

Les principales étapes liées aux forages comprennent :

- Échantillonnage
- Vérification des données

II.3.3.1. Échantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever des portions représentatives de dépôts meubles et de roches superficielles. Il permet de réaliser des analyses détaillées en laboratoire sur les propriétés mécaniques, granulométriques et hydriques des sols (granulométrie, plasticité, résistance au cisaillement) afin de caractériser finement le comportement du sol.

Les méthodes principales d'échantillonnage incluent :

- **Tarières à tige creuse** pour les sols cohérents et fins, avec ou sans piston, permettant de récupérer des échantillons intacts
- **Cuillères fendues** pour les sols granulaires tels que sables et graviers
- Descente progressive de la tarière jusqu'au **socle rocheux**, afin de déterminer la profondeur exacte de la roche et la succession des couches

Chaque échantillon est prélevé tous les **6 mètres ou selon les unités stratigraphiques rencontrées**, afin de garantir une représentation fidèle du sol du site. Les échantillons sont ensuite **conditionnés et transportés au laboratoire pour analyses détaillées**.

II.3.3.2. Vérification

La vérification vise à contrôler la fiabilité des données obtenues par les forages et les levés géophysiques. Elle permet de :

- Confirmer la profondeur du socle rocheux et l'épaisseur des dépôts meubles,
- Détecter d'éventuelles anomalies ou zones non conformes aux prévisions,
- Compléter les informations pour les zones moins accessibles ou inconnues.

Pour cela, on utilise parfois des trains de tarières à tige pleine, accompagnés de la collecte des débris ramenés en surface, qui fournissent des indications supplémentaires sur les horizons stratigraphiques traversés.

La combinaison des informations issues de l'échantillonnage et de la vérification permet d'obtenir une vision complète et fiable de la stratigraphie, essentielle pour les étapes suivantes de l'étude géotechnique.

II.4. Travaux de laboratoire

Les travaux en laboratoire constituent une étape fondamentale dans l'étude géotechnique d'un site. Après le prélèvement des échantillons sur le terrain, ces derniers sont analysés afin de déterminer les propriétés physiques, mécaniques et hydriques des sols. Ces analyses permettent de compléter et de valider les informations obtenues sur le terrain, et servent de base à la conception des fondations et à l'évaluation des risques liés aux sols.

Les investigations en laboratoire sont adaptées en fonction de la nature des sols et des informations recherchées. On distingue généralement deux grandes catégories : les sols granulaires et les sols cohérents, chacune faisant l'objet de méthodes d'analyse spécifiques.

II.4.1. Sols granulaires

Les sols granulaires regroupent les sables, graviers et cailloux. L'objectif principal de l'analyse en laboratoire est de déterminer la granulométrie, c'est-à-dire la répartition des tailles des particules, et d'évaluer certaines propriétés physiques du sol.

La granulométrie permet de **prédire le comportement mécanique et hydraulique** du sol, notamment :

- sa perméabilité,
- sa résistance à la compression,
- sa capacité à supporter des charges,
- sa réaction au gel et au dégel.

II.4.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à séparer et mesurer les différentes fractions de particules à l'aide de tamis de différentes tailles. Les étapes principales incluent :

- Sécher l'échantillon afin d'éliminer l'humidité qui pourrait fausser les mesures,
- Tamiser successivement le sol pour déterminer la proportion de chaque granulométrie,
- Classer le sol selon les normes reconnues en mécanique des sols.

Les classes granulométriques usuelles sont :

- Enrochement : $D > 200 \text{ mm}$
- Cailloux : $200 > D > 80 \text{ mm}$
- Gravier : $80 > D > 2.0 \text{ mm}$
- Sable grossier : $2.0 > D > 0.6 \text{ mm}$
- Sable moyen : $0.6 > D > 0.2 \text{ mm}$
- Sable fin : $0.2 > D > 0.06 \text{ mm}$
- Silt : $0.06 > D > 0.002 \text{ mm}$
- Argile : $D < 0.002 \text{ mm}$

La caractérisation des sols s'est effectuée dans le laboratoire. Les échantillons prélevés au forage subissent des tests physiques et chimiques (granulométrie, plasticité, résistance au cisaillement) afin de caractériser finement le comportement du sol. Cette classification granulométrique fournit une base quantitative pour évaluer le comportement général des sols, comme la capacité portante, la perméabilité et la réponse aux charges.

II.4.2. Sols cohérents

Les sols cohérents, comme les argiles et certains limons, se caractérisent par leur cohésion interne, leur capacité à résister à la déformation et leur comportement plastique. L'étude en laboratoire de ces sols vise à comprendre **leur résistance mécanique, leur teneur en eau et leurs propriétés plastiques**, informations essentielles pour évaluer la stabilité des fondations et prévenir les risques de tassement ou de glissement.

II.4.2.1. Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement détermine la capacité du sol à supporter des contraintes avant de céder. Elle est mesurée grâce à différents essais :

- **Essai au cône (Fall cone test, CO)** : rapide et précis, il évalue la résistance en mesurant la profondeur de pénétration d'un cône dans l'échantillon.
- **Essai au scissomètre de laboratoire (SC)** : simule le cisaillement en mesurant la force nécessaire pour rompre le sol à un niveau donné.
- **Essai de compression simple (CS)** : réalisé principalement sur les sols cohérents, il permet de mesurer la résistance à la compression simple et d'estimer la résistance au cisaillement non drainée.
- **Essai de cisaillement direct (Boîte de cisaillement)** : permet de déterminer la cohésion (**c**) et l'angle de frottement interne (**ϕ**) du sol, paramètres essentiels pour évaluer la résistance au cisaillement, la stabilité des terrains et la capacité portante.
- **Essai triaxial** : l'un des essais géotechniques les plus complets, il permet de déterminer la cohésion (**c**) et l'angle de frottement interne (**ϕ**) sous différentes conditions de drainage et de chargement, en reproduisant les contraintes réelles exercées sur le sol.

Ces essais permettent de caractériser le comportement mécanique des sols, de déterminer leurs paramètres de résistance et de classer les sols cohérents selon leur consistance et leur aptitude à supporter les charges. Les résultats obtenus sont largement utilisés pour le dimensionnement des fondations, l'analyse de la stabilité des ouvrages et l'élaboration des cartes géotechniques.

II.4.2.2. Teneur en eau

La teneur en eau naturelle (TN) correspond à l'eau présente dans l'échantillon prélevé sur le terrain. Elle influence directement :

- la saturation et la consistance du sol,
- sa compressibilité et sa portance,
- sa sensibilité aux variations climatiques comme le gel ou le gonflement.

Tableau 3: Teneur en eau et autres propriétés

FORAGE BECANCOUR C-73		TENEUR EN EAU				AUTRES PROPRIETES			
Prof (m)	Descriptions	Teneur naturelle (●) (en % du poids de l'échantillon)	Limite de liquidité (—○) (en % du poids de l'échantillon)	Limite de plasticité (—○) (en % du poids de l'échantillon)	TN	SC (+) CO (v) CS (○)			
						(en kg/cm ²)			
		20	40	60	80	0.2	0.4	0.6	0.8
2.3	ARGILE	LP			LL				
3.3	ARGILE								
4.3	ARGILE								
5.3	ARGILE								
6.3	ARGILE								
7.3	ARGILE								
8.3	ARGILE								
10.3	ARGILE								
11.3	ARGILE								
12.3	ARGILE								

II.4.2.3. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg définissent les états physiques du sol en fonction de sa teneur en eau :

- **Limite de liquidité (LL)** : passage de l'état plastique à l'état liquide.
- **Limite de plasticité (LP)** : début du comportement plastique.
- **Indice de plasticité (IP = LL – LP)** : évalue la plasticité globale du sol ; plus l'IP est élevé, plus le sol est plastique et susceptible de se déformer sous charge.

Ces paramètres sont essentiels pour prévoir le comportement mécanique du sol et son aptitude à supporter des fondations.

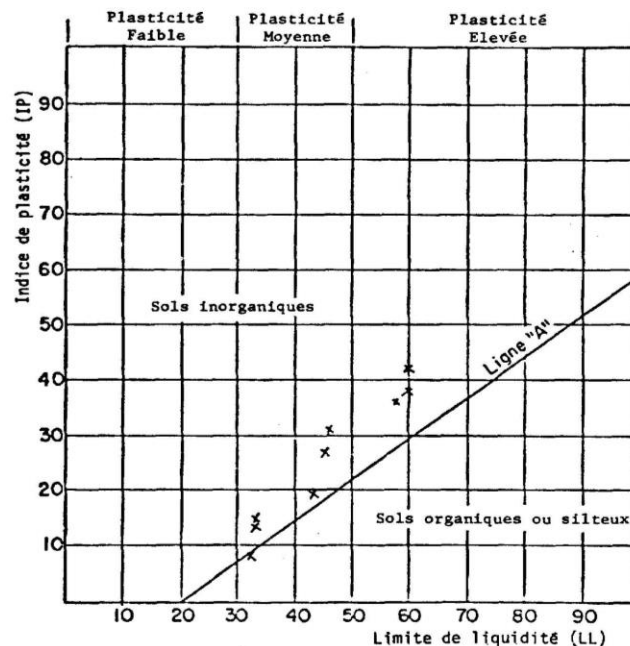


Figure 11 : Diagramme de plasticité des sols (Indice de plasticité IP) [04]

II.4.2.4. Autres essais

Des tests complémentaires peuvent être réalisés pour approfondir l'analyse :

- **Essai de consolidation** : mesure la capacité du sol à se compacter sous une charge prolongée.
- **Essai triaxial** : évalue le comportement sous contraintes multidirectionnelles et la résistance finale.
- **Analyses chimiques et minéralogiques** : déterminent la composition du sol et sa réactivité, utile pour les sols argileux ou sulfatés.

Ces données permettent d'obtenir une **compréhension complète des sols cohérents**, servant à la planification et à la conception des ouvrages d'ingénierie.

II.5. Traitement et interprétation des données

Une fois les travaux sur le terrain et les analyses en laboratoire réalisés, les données recueillies doivent être soigneusement traitées et interprétées afin de fournir une vision complète et fiable des caractéristiques géotechniques du territoire étudié. Cette étape permet de classer les sols,

d'évaluer leur aptitude à supporter des structures, et de produire des cartes et modèles utiles pour la planification et l'aménagement du territoire. Sanejouand insiste sur l'importance d'une interprétation normalisée pour la production des cartes géotechniques en France [29].

II.5.1. Classification des sols

La classification des sols est la finalité de cette étape. Elle repose sur l'identification des types de sols et de leurs caractéristiques mécaniques et granulométriques. Les données collectées, analysées et harmonisées permettent de construire une représentation cohérente et fiable du sous-sol. Les différentes couches sont classifiées selon des normes internationales (Système Unifié de classification des sols, USCS), permettant une standardisation dans la description. Cette classification des sols fournit un cadre standardisé pour décrire les propriétés des sols en ingénierie géotechnique. Ce système repose sur l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg pour une description précise et reproductible. (CL argiles basses plasticité, SM sable limoneux). Portance admissible C_u (100-300 kPa).

Cette étape est cruciale pour déterminer le comportement attendu des sols sous charge, leur capacité portante, ainsi que les risques potentiels de tassement ou de glissement. Elle permet de regrouper les sols selon :

- **Sols granulaires** : gravier, sable, silt, enrochement, classés selon la taille des particules et la granulométrie.
- **Sols cohérents** : argiles et limons, classés selon la résistance au cisaillement, la plasticité et la teneur en eau.

II.5.2. Analyse des propriétés géotechniques

L'analyse des propriétés géotechniques consiste à [29] :

- **Vérifier la cohérence des données recueillies** : comparaison entre les résultats des essais in situ et des analyses en laboratoire.
- **Évaluer les paramètres mécaniques et physiques** : résistance au cisaillement, indice de plasticité, perméabilité, compressibilité, sensibilité des sols.
- **Identifier les zones à risque** : secteurs sujets aux inondations, à l'érosion, aux glissements ou aux tassements.

Cette synthèse permet de préparer des **recommandations pour la conception des fondations et le développement du territoire**, en minimisant les risques liés aux propriétés du sol.

II.6. Modélisation spatiale (SIG, krigeage)

Pour représenter la variabilité spatiale des sols et interpréter les données de façon visuelle et quantitative, l'étude géotechnique moderne repose sur deux outils complémentaires :

- **Systèmes d'Information Géographique (SIG)** : pour superposer les données géotechniques sur des cartes numériques et effectuer des analyses spatiales complexes.
- **Interpolation géostatistique (Krigage)** : les méthodes géostatistiques, dont le krigeage constitue la technique d'interpolation de référence. Cette méthode avancée permet d'estimer les valeurs des paramètres géotechniques dans les zones non sondées à partir des points mesurés. Cela produit des cartes continues de propriétés telles que l'épaisseur des dépôts, la capacité portante du sol, la résistance au cisaillement, ou la perméabilité.

L'utilisation combinée du SIG et du krigeage permet d'obtenir une modélisation 3D précise du sol, facilitant la planification, l'aménagement et la prise de décision pour la construction et la gestion du territoire.

II.6.1. Géostatistique et krigeage

La géostatistique est une branche des statistiques appliquées qui étudie les phénomènes naturels répartis dans l'espace, à la frontière entre les mathématiques et les sciences de la Terre. Elle a été développée à partir des années 1960 par Georges Matheron [30], qui formalisa les travaux de l'ingénieur minier sud-africain Danie G. Krige (Matheron, 1963[31], cité dans Wikipédia). Son principal domaine d'application historique a été l'estimation des gisements miniers, mais son champ d'utilisation s'est depuis largement étendu aux sciences de l'environnement et à la géotechnique [32].

La géostatistique repose sur le concept de variable régionalisée, c'est-à-dire une variable qui prend des valeurs en fonction de sa localisation spatiale [33]. La démarche géostatistique comporte généralement quatre étapes successives : la collecte des données, l'étude statistique et le traitement des données, l'étude variographique (analyse de la relation spatiale des données récoltées), et enfin l'estimation par krigeage.

Le krigeage est la méthode d'estimation linéaire qui garantit le minimum de variance sous certaines hypothèses [32]. Il réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. Le krigeage est considéré comme le meilleur estimateur linéaire non-biaisé (Best Linear Unbiased Estimator - BLUE) ; il se fonde sur une méthode objective [32].

II.6.1.1. Principes et fondements théoriques du Krigeage

Le principe de fonctionnement repose sur l'estimateur par krigeage qui s'exprime comme une combinaison linéaire des données observées aux points de mesure :

$$Z^*(s_0) = \sum \lambda_i Z(s_i)$$

Où $Z(s_i)$ est la valeur mesurée à l'emplacement i , λ_i la pondération inconnue affectée à la valeur relevée, s_0 l'emplacement de prévision, et N le nombre de valeurs relevées. Contrairement aux méthodes d'interpolation déterministes telles que l'Inverse Distance Weighting (IDW), où la pondération λ_i dépend uniquement de la distance par rapport à l'emplacement de prévision, le krigeage prend en compte non seulement la distance entre les données et le point d'estimation, mais également les distances entre les données deux à deux [32]. Cette caractéristique lui confère une supériorité statistique, car il intègre la structure spatiale globale des données. Pour utiliser cette disposition spatiale dans la pondération, il est nécessaire de quantifier l'auto-corrélation spatiale via le variogramme [34].

- **Krigeage simple** : l'espérance de la variable aléatoire est connue et constante.
- **Krigeage ordinaire** : l'espérance est inconnue mais constante sur le domaine étudié. C'est la variante la plus couramment utilisée en géotechnique [35]
- **Krigeage universel** : l'espérance n'est pas constante mais peut être modélisée par une tendance (dérive) polynomiale.
- **Krigeage à dérive externe** : intègre une variable auxiliaire connue en tout point pour modéliser la tendance.
- **Cokrigeage** : extension multivariable permettant d'estimer une variable à partir de plusieurs variables corrélées spatialement [33]. Par exemple, on peut estimer la résistance au cisaillement d'un sol à partir de la cohésion et de l'angle de frottement mesurés aux points de sondage. Le

cokrigeage donne de meilleurs résultats que le krigage classique lorsque les variables auxiliaires sont fortement corrélées à la variable principale [32].

II.6.1.2. Le variogramme.

Le variogramme est l'outil central de la géostatistique. Il permet d'analyser et de modéliser la continuité spatiale du phénomène étudié. Le variogramme expérimental est calculé à partir des données mesurées, puis on ajuste un modèle théorique (sphérique, exponentiel, gaussien, etc.) qui servira de base au système de krigage [32].

Tableau 4: Synthèse des principales méthodes de krigage et de leur pertinence en géotechnique.

Méthode	Hypothèse principale	Application typique en géotechnique
Krigeage ordinaire (KO)	Stationnarité intrinsèque ; moyenne inconnue mais constante	Estimation de paramètres stationnaires (ex. CPT, N-SPT dans une couche homogène)
Krigeage simple (KS)	Stationnarité d'ordre 2 ; moyenne connue	Utilisé comme étape intermédiaire ou dans des contextes très spécifiques
Krigeage universel (KU)	Stationnarité intrinsèque avec tendance (dérive)	Modélisation de paramètres présentant un gradient spatial (pression interstitielle, résistance selon la profondeur)
Krigeage indicateur (KI)	Méthode non paramétrique basée sur une fonction indicatrice d'un seuil	Cartographie des faciès ou estimation de la probabilité de dépassement d'un seuil (zone liquéfiable)
Krigeage 3D	Extension des modèles à trois dimensions	Modélisation volumique du sous-sol à partir de données de forages

Ce modèle quantifie la corrélation spatiale entre les points : plus deux points sont proches, plus leurs valeurs sont susceptibles d'être similaires ; cette similarité décroît généralement avec la distance.

II.6.2. Intégration du krigeage dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent la plateforme d'intégration naturelle pour les résultats du krigeage. Ils permettent de superposer les données géotechniques sur des cartes numériques et d'effectuer des analyses spatiales complexes. L'utilisation combinée du SIG et du krigeage permet d'obtenir une modélisation tridimensionnelle précise du sol, facilitant la planification, l'aménagement et la prise de décision pour la construction et la gestion du territoire.

Les principaux logiciels SIG intègrent des modules spécifiques pour la réalisation d'analyses géostatistiques. ArcGIS Pro, par exemple, dispose de l'extension Geostatistical Analyst, un outil puissant qui utilise les méthodes d'interpolation spatiale pour générer des estimations précises et fiables pour des endroits inconnus (ESRI). De même, le module Spatial Analyst d'ArcGIS Pro propose l'outil Krigeage, qui implique d'analyser de manière interactive le comportement spatial du phénomène représenté par les valeurs z avant de sélectionner la meilleure méthode d'estimation pour la génération de la surface en sortie (Fonctionnement de l'outil Krigeage, ArcGIS Pro).

II.6.2.1. Processus d'intégration.

L'intégration du krigeage dans un SIG suit une démarche structurée. La première étape consiste à rassembler l'ensemble des données ponctuelles issues des forages, essais in situ et analyses de laboratoire dans une base de données géographique. Chaque point de mesure est géoréférencé avec ses coordonnées spatiales et associé à ses valeurs de paramètres géotechniques (épaisseur des dépôts, résistance au cisaillement, perméabilité, etc.). Dans un second temps, le module géostatistique du SIG (tel que Geostatistical Analyst d'ArcGIS) est utilisé pour calculer le variogramme expérimental des données, ajuster un modèle théorique et réaliser l'interpolation par krigeage. Le résultat est une carte raster continue couvrant l'intégralité de la zone d'étude, où chaque pixel reçoit une valeur estimée du paramètre considéré (ArcGIS Pro Documentation). En complément, le SIG peut générer une carte de variance d'estimation (kriging variance map) qui représente, pixel par pixel, l'incertitude associée à chaque estimation. Cette information est cruciale pour identifier les zones où des

investigations supplémentaires sont nécessaires pour réduire les incertitudes (ArcGIS Pro Documentation).

II.6.2.2. Apports de l'intégration SIG-krigeage.

L'utilisation combinée du SIG et du krigeage représente aujourd'hui une approche incontournable pour la cartographie géotechnique moderne. La géostatistique offre un cadre théorique rigoureux pour traiter la variabilité spatiale inhérente aux sols, tandis que le SIG fournit une plateforme puissante pour l'intégration, la visualisation et l'analyse des données spatiales. Le développement récent de variantes telles que le krigeage bayésien empirique (EBK) ouvre la voie à des interpolations plus robustes, particulièrement dans des contextes où le nombre de points de sondage est limité. La modélisation 3D précise du sol obtenue par cette approche constitue un outil indispensable pour la planification urbaine, la conception des infrastructures et la prévention des risques naturels.

Plusieurs avantages sont offerts pour la cartographie géotechnique par l'intégration du krigeage dans un SIG : Elle permet tout d'abord une visualisation continue des propriétés géotechniques, transformant des données ponctuelles en cartes exploitables pour l'aménagement. Les décideurs peuvent ainsi identifier d'un seul coup d'œil les zones de sols favorables et défavorables. Ensuite, l'intégration permet la superposition multicouche : les cartes issues du krigeage (épaisseur des dépôts, résistance au cisaillement, perméabilité, etc.) peuvent être superposées entre elles et avec d'autres couches d'information (topographie, hydrographie, zones inondables, plans d'urbanisme) pour des analyses d'aptitude complexes. Le krigeage fournit également une estimation quantitative de l'incertitude via la variance de krigeage, une information que les méthodes déterministes ne peuvent pas fournir (Fonctionnement de l'outil Krigeage, ArcGIS Pro). Cette quantification de l'incertitude est essentielle pour une gestion des risques géotechniques éclairée. Enfin, les modèles 3D du sous-sol peuvent être construits en interpolant par krigeage non seulement en plan mais également en profondeur, permettant de visualiser la succession des couches de sol et leur variabilité spatiale dans les trois dimensions.

II.7. Édition et diffusion des cartes géotechniques

L'édition et la diffusion des cartes géotechniques constituent l'étape finale du processus d'étude, permettant de rendre accessibles les informations recueillies et analysées aux différents utilisateurs : ingénieurs, urbanistes, aménageurs et décideurs. Cette phase assure que les données collectées sur le terrain et en laboratoire sont transformées en outils pratiques et

exploitables pour la planification et la gestion du territoire. La mise en forme finale intègre les résultats sous un format accessible à différents utilisateurs.

II.7.1. Formats numériques et imprimés

Les cartes géotechniques peuvent être produites sous **différents formats** afin de répondre aux besoins variés des utilisateurs :

- **Formats papier** : Les cartes sont diffusées sous forme papier pour certains besoins pratiques. Elles sont imprimées sur des supports de grande taille, faciles à consulter sur le terrain ou en bureau d'étude. Elles permettent une visualisation claire des zones, des épaisseurs de sols et des risques associés.
- **Formats numériques** : Les cartes sont principalement réalisées dans des formats numériques interactifs, fichiers compatibles avec les systèmes SIG (Systèmes d'Information Géographique), permettant des analyses spatiales avancées, des superpositions de couches et des mises à jour faciles. Les formats numériques assurent également l'intégration dans des plateformes web ou des applications mobiles pour un accès rapide et interactif. La production en double format assure que tous les acteurs, quel que soit leur outil de travail, puissent utiliser efficacement les données géotechniques.

II.7.2. Rapports techniques

Chaque carte est accompagnée de rapports techniques expliquant les méthodes utilisées, les paramètres mesurés, et les limites interprétatives. En complément ces rapports techniques détaillés sont rédigés pour présenter :

- Les méthodes utilisées lors des **levés sur le terrain et en laboratoire**.
- L'**interprétation des résultats**, y compris la classification des sols, l'identification des risques et les recommandations techniques.
- Les **analyses comparatives** entre les données existantes et les nouvelles observations, pour valider les conclusions.

Ces rapports fournissent un contexte scientifique complet qui permet aux décideurs de comprendre les fondements des cartes et de prendre des décisions éclairées pour l'aménagement du territoire.

II.7.3. Accessibilité des données

Pour l'usage optimal, les cartes doivent être mises à disposition des acteurs publics, privés, et chercheurs, avec des interfaces conviviales favorisant la compréhension et l'exploitation. La diffusion des cartes et des rapports doit garantir que les informations soient facilement accessibles et compréhensibles pour tous les utilisateurs potentiels :

- Les **services gouvernementaux** et collectivités locales pour la planification urbaine et rurale.
- Les **entreprises de construction et d'ingénierie** pour la conception et l'exécution de projets.
- Le **grand public**, lorsque pertinent, pour sensibiliser aux risques géotechniques dans certaines zones.

L'accessibilité implique également la **mise à jour régulière des cartes**, l'organisation des bases de données et la documentation des sources utilisées, afin d'assurer **la fiabilité et la pertinence des informations diffusées dans le temps**.

II.7.4. Mise à jour et actualisation des cartes géotechniques

L'actualisation des cartes géotechniques constitue une exigence fondamentale pour garantir leur fiabilité, leur pertinence et leur efficacité dans l'aménagement du territoire. En effet, les conditions géotechniques d'un site ne sont pas statiques et peuvent évoluer au cours du temps sous l'effet de facteurs naturels et anthropiques, ce qui rend indispensable une mise à jour régulière des données et des documents cartographiques. Arnould & Vantroys avaient déjà envisagé des systèmes automatiques pour faciliter cette actualisation [24].

Les changements naturels du milieu constituent la première raison de cette nécessité d'actualisation. Le sous-sol n'est pas statique, des facteurs naturels et anthropiques modifient significativement ses caractéristiques. En conséquence, les données géotechniques évoluent avec le temps en raison de ces modifications naturelles du sol (érosion, séismes, variations hydrogéologiques et inondations), et des activités humaines (constructions, excavations, pompages). Ces évolutions peuvent rendre obsolètes certaines informations utilisées initialement pour la planification ce qui rend nécessaire une mise à jour régulière des cartes.

Par ailleurs, l'évolution des techniques et des méthodes d'investigation contribue à rendre nécessaire l'actualisation des cartes géotechniques. Les progrès en matière de SIG, de télédétection, de modélisation 3D et d'intelligence artificielle permettent aujourd'hui d'obtenir des données plus précises et plus détaillées qu'auparavant. Il devient donc pertinent de réviser les anciennes cartes afin d'intégrer ces nouvelles technologies et d'améliorer la qualité des analyses.

L'actualisation régulière permet également de réduire les incertitudes liées à l'utilisation de données anciennes. Des informations obsolètes peuvent conduire à des erreurs d'interprétation et à des décisions inadaptées en matière d'aménagement, augmentant ainsi les risques techniques et économiques. Une mise à jour périodique garantit donc une meilleure sécurité et une planification plus fiable.

II.7.4.1. Fréquence et modalités de mise à jour

La fréquence de mise à jour des cartes dépend de plusieurs facteurs [1] :

- Caractéristiques du territoire : certaines zones sont plus sujettes à des changements géotechniques rapides (zones d'alluvions, terrains instables), nécessitant des révisions plus fréquentes.
- Utilisation prévue des cartes : les projets à grande échelle ou sensibles aux risques géotechniques exigent des informations à jour pour minimiser les risques et les coûts.
- Disponibilité de nouvelles données : les levés récents, les études en laboratoire et les observations terrain permettent d'enrichir et de corriger les cartes existantes.

En pratique, il est recommandé de réviser les cartes tous les 5 à 10 ans ou plus tôt dans les zones à haut risque ou à fort développement [1].

II.8. Apport des nouvelles technologies

L'apport des nouvelles technologies dans le domaine des cartes géotechniques a profondément transformé les méthodes d'acquisition, de traitement, d'analyse et de diffusion des données. Ces innovations ont permis d'améliorer significativement la précision des études, la rapidité d'exécution et la qualité des résultats utilisés dans l'aménagement du territoire [39].

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) représentent l'une des avancées majeures dans ce domaine. Ils permettent de centraliser, organiser et superposer différentes couches d'informations géotechniques, géologiques, topographiques et environnementales. Grâce aux SIG, il devient possible de réaliser des analyses spatiales complexes, de visualiser les zones à risques et de produire des cartes interactives facilitant la prise de décision [39].

La télédétection constitue également une technologie essentielle dans l'amélioration des cartes géotechniques. Grâce aux images satellites et aux photographies aériennes, elle permet d'observer de vastes territoires et de détecter des changements dans le relief, la végétation ou l'humidité des sols. Ces informations sont particulièrement utiles pour identifier les zones instables, les phénomènes d'érosion ou les variations morphologiques difficiles à observer sur le terrain [45].

L'utilisation des drones a également révolutionné la collecte des données géotechniques. Ils permettent d'effectuer des relevés précis et rapides sur des zones difficiles d'accès, tout en fournissant des modèles numériques de terrain à haute résolution. Ces modèles facilitent l'analyse des pentes, des volumes de matériaux et des structures superficielles du sol [37].

Par ailleurs, la modélisation numérique en trois dimensions constitue un outil puissant pour représenter la structure du sous-sol de manière réaliste. Elle permet de simuler le comportement des sols sous différentes contraintes et d'évaluer les risques géotechniques avec une meilleure précision. Cette approche améliore considérablement la compréhension des phénomènes complexes liés au terrain [37].

L'intelligence artificielle et les techniques d'apprentissage automatique apportent également une contribution croissante. Elles permettent d'analyser de grandes quantités de données géotechniques, de détecter des patterns invisibles à l'œil humain et d'améliorer la prédiction des comportements des sols. Ces technologies renforcent la capacité d'anticipation des risques et optimisent les modèles de planification [38].

Enfin, les bases de données centralisées et les systèmes de cloud computing facilitent le stockage, le partage et la mise à jour des informations géotechniques. Elles assurent une meilleure collaboration entre les différents acteurs (ingénieurs, urbanistes, chercheurs et administrations) et garantissent un accès rapide et sécurisé aux données [2].

En conclusion, les nouvelles technologies jouent un rôle déterminant dans l'évolution des cartes géotechniques. Elles améliorent la précision, la rapidité et la fiabilité des études, tout en offrant des outils puissants pour une gestion plus efficace et durable du territoire [37].

II.8.1. Technologies modernes

L'actualisation des cartes bénéficie des progrès technologiques qui permettent d'améliorer la précision et l'efficacité :

- Systèmes d'Information Géographique (SIG) : permettent une intégration facile des nouvelles données et des analyses spatiales avancées [39].
- Télédétection et drones : offrent des relevés rapides et précis, en particulier pour détecter les changements topographiques ou les zones à risques [45].
- Bases de données centralisées et cloud : facilitent l'accès simultané aux informations par différents acteurs et assurent une traçabilité complète des mises à jour [2].

L'intégration des données de télédétection, des drones et des capteurs permanents (géotechniques, hydrologiques) permet une surveillance continue facilitant l'actualisation en quasi temps réel. Ces technologies contribuent à réduire les erreurs, accélérer le processus d'actualisation et fournir des cartes interactives et dynamiques [37].

II.8.2. Coordination institutionnelle

L'actualisation requiert une coordination étroite entre différentes entités publiques (services géologiques, urbanisme, environnement) et privées (bureaux d'études, laboratoires), ainsi que des protocoles normalisés pour assurer cohérence et qualité [25].

Les différentes institutions impliquées sont :

- Services gouvernementaux : ministères de l'équipement, de l'urbanisme et de l'environnement, responsables de la planification et de la régulation [25].
- Organismes de recherche et universités : apportent un soutien scientifique et technique pour interpréter les nouvelles données [18].

- Entreprises privées et bureaux d'études : participent aux levés et fournissent des informations actualisées pour les projets spécifiques [40].

Une coordination efficace permet de garantir que les informations mises à jour sont cohérentes, fiables et disponibles pour tous les acteurs concernés, renforçant ainsi la sécurité et la durabilité des aménagements futurs [38].

II.8.3. Avantages et limites des cartes géotechniques

• Avantages

- Anticipation des risques [16],
- Optimisation économique des projets [1],
- Sécurité renforcée [41],
- Outil de dialogue entre acteurs du territoire [25]

• Limites

- Coût élevé de réalisation et mise à jour [37]
- Données souvent partielles ou locales [18]
- Complexité d'interprétation pour les non-spécialistes [3]
- Les cartes ne remplacent pas les études spécifiques sur site [10]

II.9. Limites et perspectives des cartes géotechniques

Les cartes géotechniques constituent un outil indispensable dans l'aménagement du territoire, cependant leur utilisation présente certaines limites qui doivent être prises en considération afin d'améliorer leur efficacité et leur fiabilité. En parallèle, les évolutions technologiques et scientifiques ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour leur développement et leur exploitation future [1].

Parmi les principales limites, on note tout d'abord la dépendance à la qualité et à la densité des données disponibles. Les cartes géotechniques reposent sur des investigations de terrain, des essais en laboratoire et des données historiques. Lorsque ces informations sont insuffisantes ou mal réparties spatialement, la précision des cartes peut être réduite, ce qui entraîne des incertitudes dans l'interprétation des résultats [18]. Une autre limite importante concerne l'hétérogénéité naturelle des sols. Les formations géologiques peuvent varier rapidement sur de

courtes distances, ce qui rend difficile une représentation parfaitement fidèle du sous-sol. Malgré l'utilisation de méthodes d'interpolation comme le krigeage, certaines zones restent sujettes à des approximations [36].

Les coûts liés aux investigations géotechniques constituent également une contrainte. La réalisation de forages, d'essais in situ et d'analyses en laboratoire nécessite des moyens techniques et financiers importants, ce qui peut limiter la quantité de données disponibles, notamment dans les projets de grande envergure ou dans les régions moins développées [37]. Par ailleurs, l'interprétation des données géotechniques requiert une expertise spécialisée. Une mauvaise interprétation peut conduire à des erreurs dans la classification des sols ou dans l'évaluation des risques, ce qui peut compromettre la fiabilité des décisions d'aménagement [3]. Malgré ces limites, les perspectives d'évolution des cartes géotechniques sont très prometteuses. L'intégration des technologies numériques avancées, telles que les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la télédétection, les drones et les modèles 3D, permet d'améliorer considérablement la précision et la mise à jour des données [46].

L'utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique constitue également une perspective majeure. Ces technologies peuvent faciliter l'analyse de grandes quantités de données géotechniques, améliorer la prédiction des comportements des sols et optimiser la modélisation des risques [38]. En outre, le développement de bases de données géotechniques centralisées et collaboratives favorise le partage des informations entre les différents acteurs de l'aménagement du territoire, améliorant ainsi la qualité des études et la cohérence des décisions [2].

En conclusion, bien que les cartes géotechniques présentent certaines limites liées aux données, aux coûts et à la complexité des sols, leurs perspectives d'évolution sont importantes. Les avancées technologiques et scientifiques permettent d'envisager des outils de plus en plus précis, dynamiques et performants, renforçant ainsi leur rôle dans la planification et la gestion durable du territoire [37].

II.9.1. Limites techniques

Les cartes géotechniques, malgré leur importance majeure dans l'aménagement du territoire, présentent plusieurs limites techniques liées à la nature des méthodes utilisées pour la collecte,

le traitement et l'interprétation des données. Ces contraintes peuvent influencer la précision des résultats et la fiabilité des analyses produites [18].

L'une des principales limites techniques réside dans la résolution spatiale des données. Les investigations géotechniques, telles que les forages, les essais in situ et les levés géophysiques, sont réalisées sur des points ponctuels. Par conséquent, la représentation continue du sous-sol repose sur des interpolations qui peuvent ne pas refléter fidèlement la complexité réelle des formations géologiques, notamment dans les zones hétérogènes [36].

Une autre limite importante concerne les méthodes d'investigation elles-mêmes. Chaque technique géotechnique possède ses propres contraintes et marges d'erreur. Par exemple, les méthodes géophysiques fournissent des résultats indirects qui nécessitent une interprétation, tandis que les essais in situ peuvent être influencés par les conditions du terrain, l'humidité ou la perturbation du sol lors des mesures. Ces facteurs peuvent introduire des incertitudes dans les résultats finaux [23].

La variabilité naturelle des sols constitue également une difficulté technique majeure. Les sols présentent souvent des changements rapides de leurs propriétés mécaniques et hydrauliques sur de courtes distances, ce qui rend difficile leur modélisation précise. Même avec des techniques avancées comme le krigeage ou la modélisation 3D, certaines zones restent approximatives [34].

Par ailleurs, les limites techniques sont aussi liées aux outils de traitement et de modélisation. Bien que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les logiciels spécialisés aient considérablement amélioré l'analyse des données, ils dépendent fortement de la qualité des informations d'entrée. Des données incomplètes ou mal calibrées peuvent conduire à des résultats erronés [47].

Enfin, les conditions de terrain peuvent également constituer une contrainte technique. L'accessibilité difficile de certaines zones, les conditions climatiques défavorables ou les obstacles naturels peuvent limiter la densité des points de mesure et donc réduire la précision globale des cartes [41].

En conclusion, les limites techniques des cartes géotechniques sont principalement liées à la nature ponctuelle des données, aux incertitudes des méthodes d'investigation et à la complexité

des sols. Ces contraintes nécessitent une interprétation prudente des résultats et une amélioration continue des techniques de collecte et de modélisation [3].

II.9.2. Incertitudes des données

Les incertitudes des données constituent une limite importante dans l'élaboration et l'interprétation des cartes géotechniques. Elles proviennent de plusieurs sources et peuvent influencer la fiabilité des résultats, ainsi que la qualité des décisions prises en matière d'aménagement du territoire. La prise en compte de ces incertitudes est donc essentielle pour garantir une utilisation prudente et adaptée des informations géotechniques [18].

L'une des principales sources d'incertitude est liée à la nature même des données géotechniques. Les informations obtenues sur le terrain proviennent d'investigations ponctuelles, telles que les forages, les essais in situ ou les levés géophysiques. Ces mesures ne représentent qu'un échantillon limité du sous-sol, ce qui implique une extrapolation pour couvrir l'ensemble du territoire étudié. Cette extrapolation peut introduire des erreurs, notamment dans les zones où les variations du sol sont rapides et complexes [36].

Les conditions de réalisation des mesures constituent également une source d'incertitude. Les résultats des essais peuvent être influencés par des facteurs externes tels que l'humidité du sol, la température, les conditions météorologiques ou encore la qualité de l'équipement utilisé. De plus, les erreurs humaines lors des relevés ou de la manipulation des instruments peuvent affecter la précision des données collectées [23].

Une autre source d'incertitude provient de l'interprétation des données. Les résultats des essais géotechniques et des levés géophysiques nécessitent souvent une analyse experte pour être traduits en paramètres exploitables. Cette interprétation peut varier selon l'expérience de l'ingénieur ou les modèles utilisés, ce qui peut conduire à des différences dans les conclusions finales [3].

Les méthodes d'interpolation et de modélisation spatiale, telles que le krigeage ou les analyses SIG, introduisent également une part d'incertitude. Ces méthodes reposent sur des hypothèses statistiques et des modèles mathématiques qui simplifient la réalité du terrain. Par conséquent, les résultats obtenus doivent être considérés comme des estimations et non comme des valeurs exactes [36].

L'évolution naturelle du milieu constitue une source d'incertitude temporelle. Les caractéristiques géotechniques d'un site peuvent changer au fil du temps en raison de phénomènes naturels tels que l'érosion, les variations du niveau de la nappe phréatique ou les activités humaines. Ainsi, des données anciennes peuvent ne plus refléter fidèlement l'état actuel du terrain [48].

En conclusion, les incertitudes des données géotechniques proviennent à la fois des limitations des mesures, des conditions de terrain, des méthodes d'interprétation et de l'évolution du milieu naturel. Leur prise en compte est indispensable pour assurer une utilisation fiable et responsable des cartes géotechniques dans la planification et l'aménagement du territoire [1]

Conclusion

La méthodologie d'élaboration et d'actualisation des cartes géotechniques est un processus rigoureux, alliant recherches sur le terrain, analyses techniques, et intégration numérique. Ce travail multidisciplinaire garantit une connaissance précise du sous-sol, essentielle pour une gestion territoriale efficace, sûre et durable. À travers les différentes étapes présentées — de la collecte des données et des recherches préalables, jusqu'à la réalisation de travaux sur le terrain, les essais en laboratoire, l'interprétation des résultats et la cartographie géotechnique — il est possible de déterminer avec précision les caractéristiques des sols et du socle rocheux, ainsi que les zones à risques naturels. Les travaux pionniers de Peter (1966), Debaille & Ghiste (1969), Arnould & Vantroys (1970), Thomas (1970), Humbert (1972) et Sanejouand (1972) ont posé les bases méthodologiques qui continuent d'inspirer les pratiques actuelles. [26-27-24-28-29]

La connaissance de la nature évolutive des sols, l'actualisation régulière des cartes assure leur pertinence face aux aléas naturels et aux changements anthropiques. Une étude géotechnique complète et actualisée est indispensable pour prévenir les risques, optimiser les coûts de construction et assurer une gestion intelligente du territoire. La coordination entre les différentes institutions, le partage des données et la diffusion des cartes, qu'elles soient numériques ou sur support papier, renforcent la sécurité, l'efficacité et la durabilité des projets.

L'intégration des nouvelles technologies, telles que le SIG, la télédétection et le krigeage, ainsi que l'actualisation régulière des cartes, garantit que les informations restent fiables et pertinentes pour les décideurs et les ingénieurs. Ainsi, l'essor des technologies numériques,

couplé à une meilleure coordination entre acteurs, offre un potentiel remarquable d'amélioration continue de ces cartes. En intégrant ces avancées, les cartes géotechniques deviendront des outils encore plus puissants dans l'aide à la décision et la prévention des risques, inscrivant définitivement la géotechnique au cœur de l'aménagement du territoire moderne.

Chapitre III : Utilité des cartes géotechniques dans l'aménagement du territoire

III.1. Introduction

L'aménagement du territoire constitue une démarche fondamentale visant à organiser l'espace de manière rationnelle, équilibrée et durable, en tenant compte des besoins de la population, du développement économique et de la protection de l'environnement. Aussi, la connaissance précise des caractéristiques du sol et du sous-sol représente un élément essentiel pour garantir la sécurité et la pérennité des projets d'urbanisme et d'infrastructures.

Les cartes géotechniques sont des outils indispensables dans le processus d'aménagement du territoire, elles permettent de restituer visuellement les propriétés physiques, mécaniques et hydrogéologiques des terrains. Dès les années 1960-1970, les premières expériences de cartographie géotechnique systématique ont vu le jour en Europe, avec par exemple l'essai de cartographie automatique sur la ville nouvelle d'Évry [24], la carte de la région de Mons [25] ou encore celle de Clermont-Ferrand [26]. Ces travaux pionniers ont posé les bases d'une approche spatialisée des contraintes du sous-sol.

Les cartes offrent ainsi une vision globale des contraintes et des potentialités du sol, facilitant la prise de décision pour les ingénieurs, urbanistes et décideurs. Elles aident à identifier spatialement les zones favorables ou défavorables à la construction, en mettant en évidence par un zonage les secteurs exposés à des risques naturels (les glissements de terrain, les inondations ou les tassements).

Leur importance réside également dans leur capacité à réduire les incertitudes liées à la variabilité des sols et à prévenir les désordres pouvant affecter les infrastructures. En intégrant les données issues des investigations de terrain, des essais en laboratoire et des analyses spatiales, les cartes géotechniques contribuent à une meilleure planification des projets et à une optimisation des coûts de réalisation. Par ailleurs, l'évolution des technologies nouvelles, en particulier les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la télédétection et la modélisation numérique, a permis d'améliorer considérablement la précision et l'efficacité de la cartographie géotechnique. Ces avancées facilitent la manipulation, la représentation et l'interprétation des données rendant leur utilisation dans les processus de décision fortement efficaces. Ce dernier

chapitre met en lumière le rôle et l'utilité des cartes géotechniques dans l'urbanisme et l'aménagement du territoire en générale, il est mis en évidence la contribution des cartes géotechniques à la gestion des risques, à la planification des infrastructures et au développement durable.

III.1. 1. Cadre général de l'aménagement et de l'urbanisme

L'aménagement du territoire constitue une démarche globale et stratégique visant à organiser l'espace (urbain et rural) de manière rationnelle, équilibrée et durable. Il s'agit d'un processus complexe qui prend en compte les dimensions économiques, sociales, environnementales et techniques afin d'assurer un développement harmonieux des territoires. Les décisions d'aménagement reposent donc sur une connaissance approfondie des caractéristiques physiques du milieu, notamment les conditions géologiques et géotechniques, qui influencent directement ou indirectement la faisabilité et la durabilité des projets.

Le territoire, en tant que support physique d'intervention, présente une diversité de contraintes naturelles (topographie, la nature des sols, nappes phréatiques) ou encore les risques naturels (glissements de terrain, affaissement, inondations, érosion). À ces contraintes s'ajoutent des facteurs anthropiques liés aux activités humaines, tels que l'urbanisation rapide, l'exploitation des ressources et les transformations du paysage. L'aménagement du territoire doit ainsi concilier ces différents facteurs afin de limiter les impacts négatifs et d'optimiser l'utilisation de l'espace. Dans cette perspective, la planification territoriale s'appuie sur des outils techniques et réglementaires permettant d'orienter le développement urbain ou rural. Elle vise notamment à définir les zones constructibles, à protéger les espaces sensibles, et à anticiper les besoins futurs en infrastructures et en équipements. Cette planification nécessite l'intégration de données fiables et précises, parmi lesquelles les informations géotechniques occupent une place essentielle.

Les cartes géotechniques jouent un rôle fondamental dans l'aménagement de l'espace en général, car elles permettent de visualiser et d'interpréter les caractéristiques du sous-sol. Elles fournissent des indications précieuses sur la capacité portante des sols, leur stabilité, leur comportement face aux charges et leur sensibilité aux phénomènes naturels. Grâce à ces informations, les décideurs peuvent orienter les choix d'aménagement vers les zones les plus favorables et éviter les secteurs à risque. Ainsi, l'intégration des données géotechniques dans le projet d'aménagement du territoire contribue à améliorer la sécurité des constructions, à réduire

les coûts liés aux imprévus et à promouvoir un développement durable. Elle constitue de ce fait un élément clé pour une gestion efficace et responsable de l'espace, en garantissant une meilleure adéquation entre les projets d'aménagement et les contraintes du milieu naturel.

III.1.2. Contraintes naturelles et anthropiques

L'aménagement du territoire est fortement conditionné par un ensemble de contraintes qui influencent la faisabilité, le coût et la durabilité des projets. Ces dernières peuvent être classées en deux grandes catégories :

Les contraintes naturelles liées aux caractéristiques physiques du milieu, elles regroupent l'ensemble des facteurs géologiques, géomorphologiques et climatiques qui caractérisent un territoire. Parmi les plus importantes figurent la nature des sols et des formations rocheuses, la topographie, la présence de nappes phréatiques ainsi que les conditions hydrologiques. Par exemple, les terrains argileux peuvent présenter des phénomènes de gonflement et de retrait, tandis que les sols sableux peuvent être sujets à l'érosion ou à la liquéfaction. Les pentes abruptes augmentent le risque de glissements de terrain, et les zones basses peuvent être exposées aux inondations. Ces contraintes naturelles représentent des facteurs déterminants dans le choix des sites d'implantation des infrastructures et nécessitent une analyse approfondie à travers des études géotechniques.

Les contraintes anthropiques résultant des activités humaines et des transformations du territoire. Elles sont liées aux interventions humaines sur l'espace. Cette interaction entre l'homme et son espace inclue notamment l'urbanisation rapide, l'exploitation intensive des ressources naturelles, les travaux de terrassement, ainsi que les modifications du paysage naturel (le déboisement ou l'imperméabilisation des sols). Ces actions peuvent perturber l'équilibre naturel des terrains, accentuer certains risques géotechniques et engendrer de nouvelles instabilités. Une urbanisation non maîtrisée dans une zone instable peut aggraver les phénomènes de glissement ou provoquer des tassements différenciés.

L'interaction entre les contraintes naturelles et anthropiques rend l'aménagement du territoire une opération particulièrement complexe. Une mauvaise prise en compte de ces facteurs peut entraîner des conséquences irréversibles, telles que des dommages aux infrastructures, des coûts supplémentaires ou des risques pour la sécurité des populations. Ainsi, la prise en compte des

contraintes naturelles et anthropiques dès les premières phases de planification contribue à une gestion plus rationnelle, sécurisée et durable du territoire.

III.1.3. Les Plans d'urbanisme (PDAU et POS) : rôle et objectifs

Les plans d'urbanisme notamment le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) et le Plan d'Occupation des Sols (POS), sont des instruments technique et juridique de gestion, d'encadrement et d'organisation de l'espace urbain.

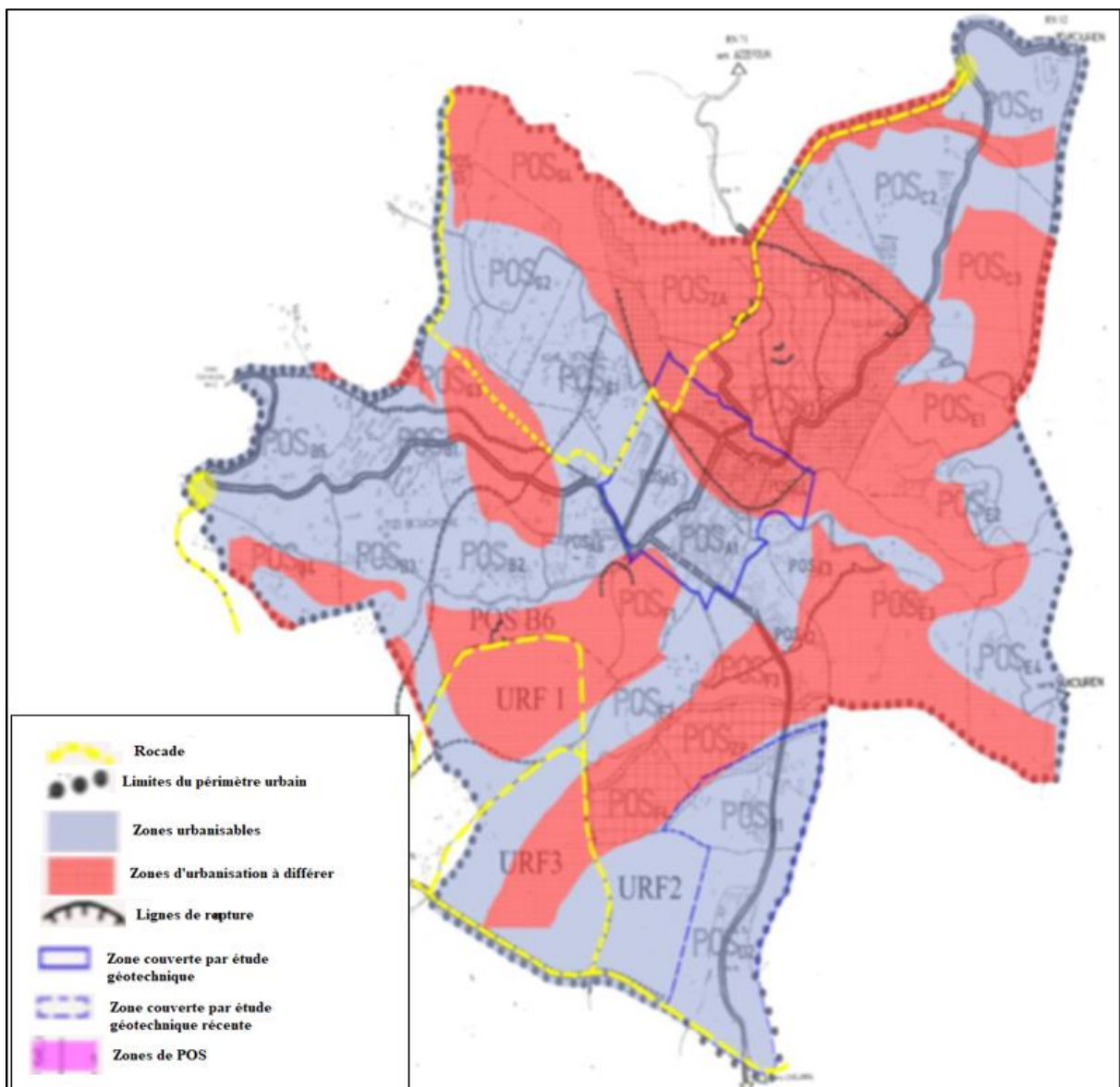


Figure 12 : Carte des secteurs d'urbanisation, ville d'Ain Témouchent (Algérie). [37]

Ils doivent impérativement tenir compte des caractéristiques physiques du sol afin d'éviter les risques liés à une urbanisation mal adaptée. Les recommandations officielles algériennes depuis

[25] ont insisté sur la nécessité d'intégrer la cartographie géotechnique dans les documents d'urbanisme, une exigence qui reste d'actualité.

III.1.3.1. Le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU)

Le PDAU, outil de planification stratégique à l'échelle communale ou intercommunale, définit les grandes orientations de développement urbain à moyen et long terme. Les cartes géotechniques apportent une contribution fondamentale, elles permettant d'identifier les zones favorables à l'extension urbaine, les secteurs à protéger et les zones soumises à des contraintes naturelles fortes. Cette intégration permet d'orienter la croissance urbaine vers des terrains stables et adaptés, tout en limitant l'exposition aux risques géotechniques.

Le rôle principal des cartes géotechniques dans le PDAU est d'assurer une répartition rationnelle et sécurisée des zones urbaines. Elles permettent d'identifier les secteurs les plus favorables à l'extension de l'urbanisation, notamment les terrains stables, bien drainés et présentant une bonne capacité portante. À l'inverse, elles mettent en évidence les zones à risques telles que les terrains instables, les zones inondables ou les secteurs sujets aux glissements de terrain, qui doivent être évités ou strictement encadrés.

III.1.3.2. Le Plan d'Occupation du Sol (POS)

Le Plan d'Occupation du Sol (POS) est un instrument réglementaire de l'urbanisme qui définit de manière précise et détaillée les règles d'utilisation des sols à l'échelle locale. Contrairement au PDAU, qui fixe des orientations générales, le POS intervient directement sur la gestion opérationnelle de l'espace en déterminant les zones constructibles, les règles de construction et les contraintes spécifiques applicables à chaque secteur.

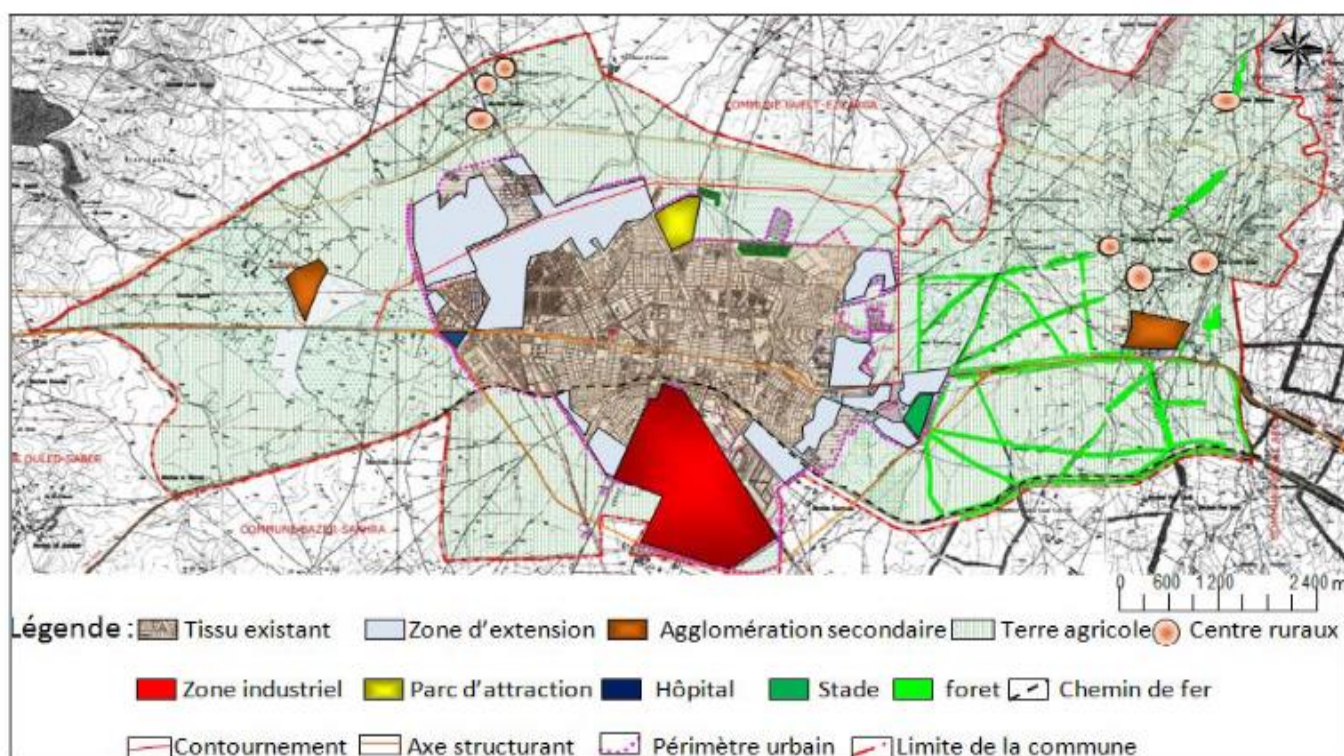


Figure 13 : Plan d'occupation du sol de la ville d'El-Eulma (Algérie), (PDAU, 2008). [38]

L'intégration des données géotechniques dans cet outil de gestion de l'espace urbain permet de définir des règles de construction adaptées à chaque zone, en tenant compte de la nature du sol, de sa capacité portante, de sa sensibilité aux glissements ou aux inondations, ainsi que de sa stabilité générale. Cela permet d'imposer des contraintes techniques telles que le type de fondations, les hauteurs de construction ou les conditions de drainage. Dans ce contexte, l'intégration des cartes géotechniques revêt une importance particulière pour garantir la sécurité et la stabilité des aménagements.

L'utilisation conjointe des cartes géotechniques avec le PDAU et le POS permet également d'améliorer la prévention des risques naturels. Les zones identifiées comme instables ou dangereuses peuvent être classées comme non constructibles ou soumises à des restrictions strictes, garantissant ainsi la sécurité des populations et la protection des infrastructures. Cette approche contribue à réduire les impacts des catastrophes naturelles et à renforcer la résilience des territoires. Cette intégration favorise une meilleure coordination entre les différents acteurs de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme en l'occurrence les urbanistes, les ingénieurs, les autorités locales et les bureaux d'études. Elle permet d'harmoniser les décisions techniques et réglementaires, en s'appuyant sur des données scientifiques fiables et actualisées. Les cartes

géotechniques constituent un levier fondamental pour une urbanisation maîtrisée et durable. Elle garantit une meilleure prise en compte des contraintes du sol dans les décisions d'aménagement, tout en assurant la sécurité, la cohérence et l'efficacité des politiques urbaines.

III.2. Intégration des cartes géotechniques dans l'aménagement

L'intégration des cartes géotechniques dans le processus l'aménagement de l'espace constitue une étape stratégique pour assurer une planification territoriale cohérente, sécurisée et durable. Elle consiste à exploiter les informations issues de la cartographie géotechnique afin d'éclairer les grandes orientations et les décisions relatives à l'organisation de l'espace en termes de localisation des projets et de gestion rationnelle des ressources foncières. Les cartes géotechniques, qui synthétisent l'ensemble des informations géotechniques collectées, permettent d'introduire une dimension plus technique, indispensable dans les processus de planification urbaine et rurale et d'atteindre des objectifs, contribuant à la réussite des projets d'aménagement du territoire et des infrastructures. Ces objectifs combinent sécurité, efficacité technique et développement durable :

III.2.1. Contribution à l'orientation stratégique de l'aménagement du territoire

La cartographie géotechnique constitue un instrument fondamental pour l'orientation du développement urbain et territorial, en permettant d'identifier les secteurs présentant la plus grande aptitude à supporter des constructions et des infrastructures durables à l'échelle nationale ou régionale. Ce rôle fonction d'aide à la décision dans le domaine de l'ingénierie et de l'aménagement repose sur une évaluation précise des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des formations superficielles, indissociable d'une démarche de planification intégrée. Dès 1966, A. Peter [28] avait proposé un essai de carte géotechnique qui servit de référence méthodologique pour de nombreuses collectivités.

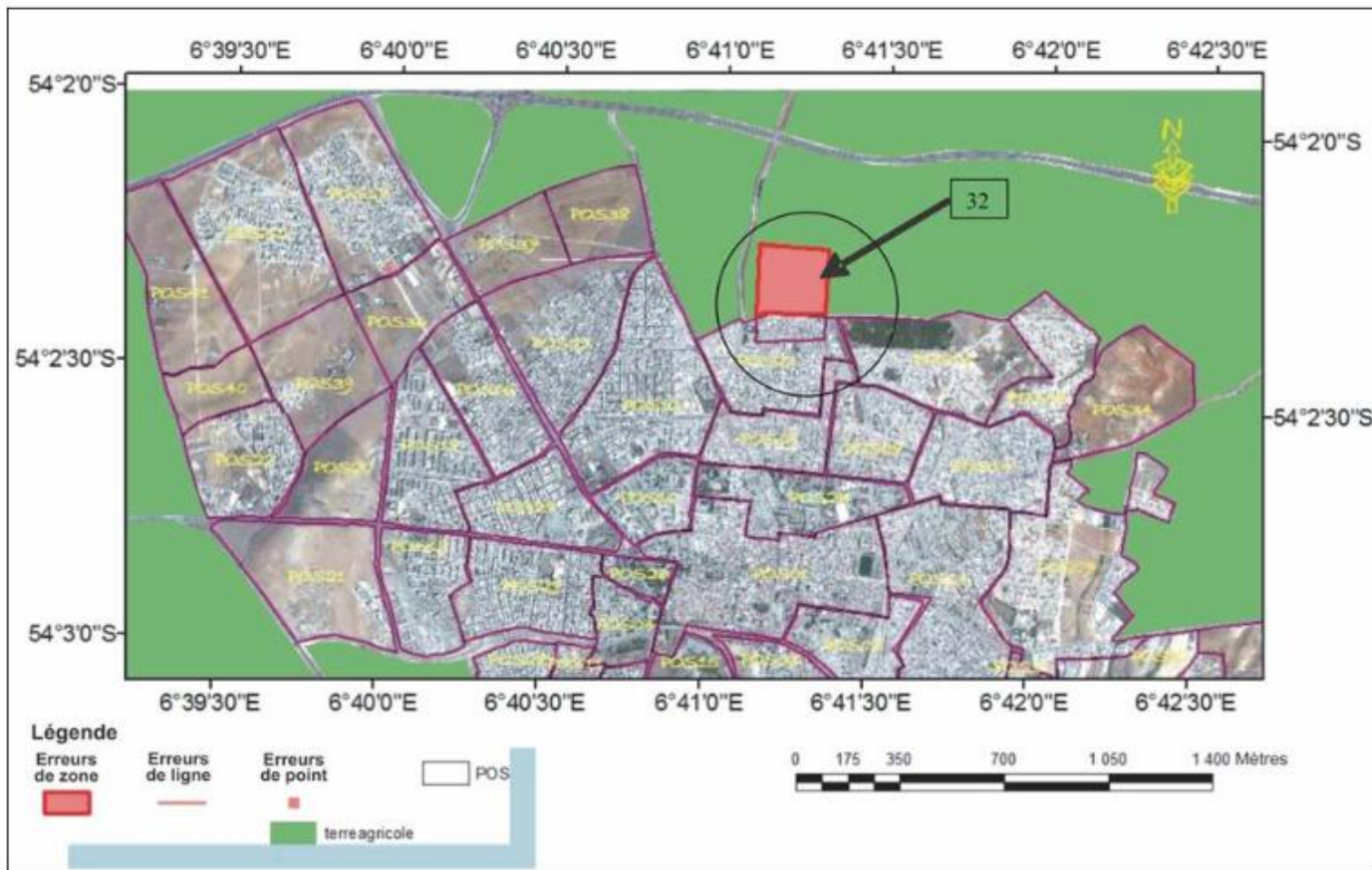


Figure 14: Carte des terrains non urbanisables (terres agricoles) de la ville d'El-Eulma (Algérie) (PDAU, 2008). [38]

III.2.2. Identification des zones favorables à l'urbanisation

L'identification des zones favorables à l'urbanisation représente un outil stratégique majeur dans l'aménagement de l'espace. Elle permet de réduire les risques liés aux mauvaises implantations, d'optimiser les investissements et de favoriser un développement urbain sécurisé, rationnel et durable. L'exploitation des cartes géotechniques pour la planification territoriale consiste à déterminer, les secteurs les plus adaptés à l'implantation des infrastructures urbaines (logements, équipements publics, réseaux de transport et zones d'activités ou industrielles). Cette démarche vise à garantir la sécurité des constructions tout en optimisant l'utilisation de l'espace disponible.

Cette identification repose sur une évaluation multicritère des propriétés géotechniques du terrain. Les principaux critères pris en compte figurent la capacité portante des sols, leur stabilité mécanique, leur perméabilité, ainsi que leur sensibilité aux phénomènes naturels tels que les glissements de terrain, les inondations ou les tassements différentiels. Les zones

présentant des sols stables, homogènes et bien drainés sont généralement considérées comme favorables à l'urbanisation, tandis que les terrains instables ou fortement contraints sont classés comme défavorables ou nécessitant des mesures de renforcement. De ce fait, ces outils offrent une aide précieuse car elles visualisent la répartition spatiale des différentes classes de sols et des niveaux de risque associés. Cette classification est possible grâce à cette représentation qui distingue clairement les zones à forte aptitude constructible ou les zones à aptitude conditionnelle et les zones inconstructibles. Cette représentation spatiale par classe d'aptitude de sites aide à la prise de décision des acteurs de l'aménagement (urbanistes, ingénieurs, responsables publics) en fournissant une base objective et scientifique.

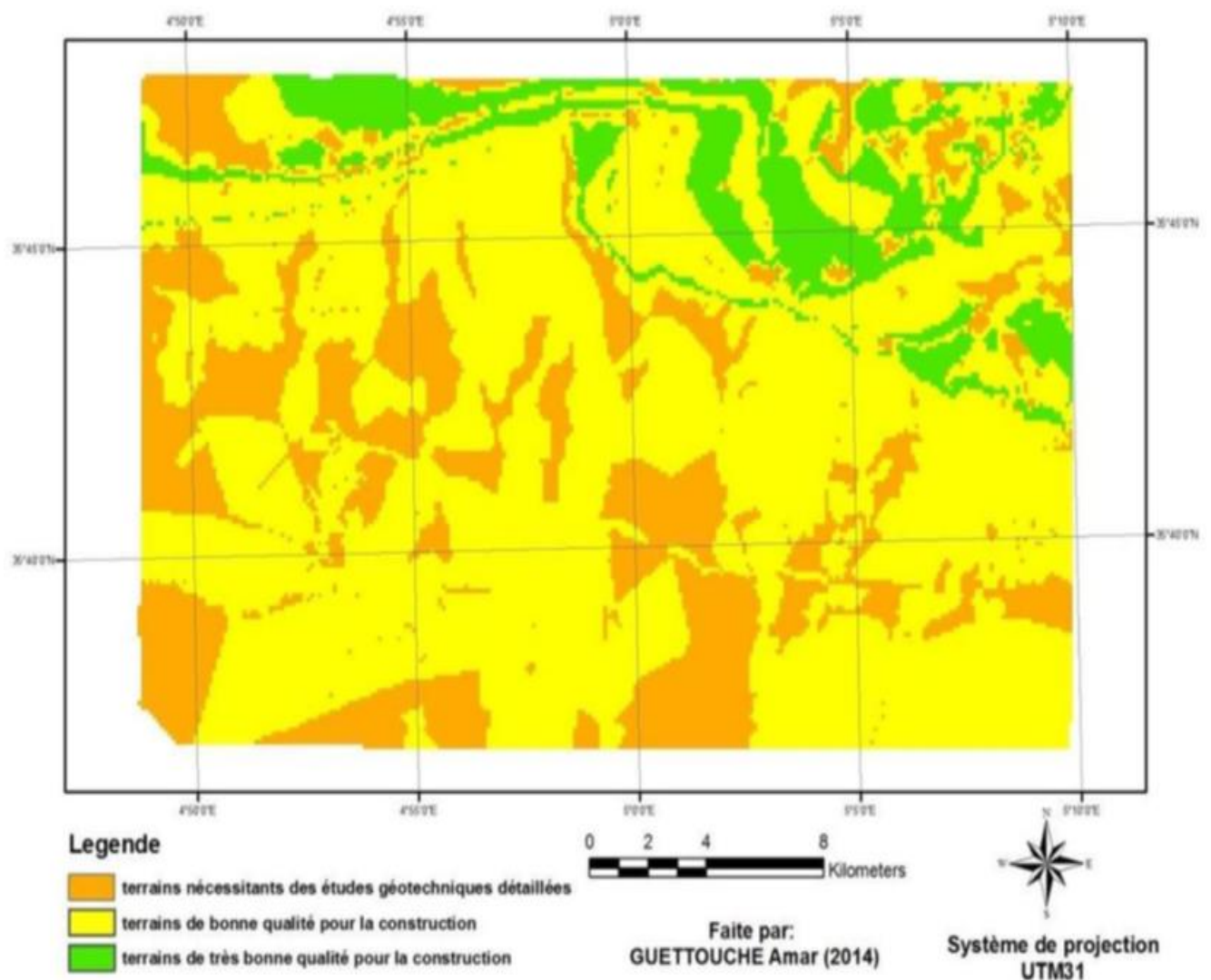


Figure 15: Carte de constructibilité de Souk Ouled Nedjaa, Alger 2018. [39]

L'identification des zones favorables ne se limite pas aux seules caractéristiques géotechniques, elle prend également en compte des facteurs complémentaires relatives à la configuration topographique, l'accessibilité, la proximité des infrastructures existantes et les contraintes environnementales. L'intégration de tous ces paramètres permet l'élaboration d'une carte de test de capacité des sites à recevoir des ouvrages et projets d'urbanisme, cette représentation permet d'obtenir une vision globale et cohérente du territoire, indispensable pour une planification équilibrée et durable.

III.2.3. Hiérarchisation des zones d'aménagement fonctionnel

La hiérarchisation de l'espace en zones d'aménagement bien définies permet d'organiser l'espace en fonction de son degré d'aptitude à recevoir des projets urbains et des infrastructures selon leur catégorie et leur taille. Cette démarche repose sur l'exploitation des cartes géotechniques et des analyses multicritères afin de classer les différentes zones de l'espace selon leur qualité géotechnique, leur niveau de contrainte et leur vocation d'aménagement. Les caractéristiques physiques et mécaniques des sols (capacité portante, stabilité des pentes, perméabilité, sensibilité aux phénomènes naturels) sont un appui utile quant à cette hiérarchisation.

Les zones présentant des conditions géotechniques favorables, avec des sols stables et homogènes, sont classées en priorité pour l'urbanisation et les grands projets d'infrastructure. En revanche, les zones présentant des contraintes importantes, comme les terrains instables, argileux ou sujets aux inondations, sont classées comme zones à éviter ou à aménager sous conditions spécifiques.

Les cartes géotechniques permettent de représenter cette hiérarchisation de manière claire et synthétique, en attribuant des classes d'aptitude ou des niveaux de priorité aux différentes unités du territoire. Cette représentation spatiale facilite la compréhension globale des potentialités et des contraintes du site, et constitue un outil d'aide à la décision pour les planificateurs et les autorités compétentes. La hiérarchisation ne se limite pas uniquement aux aspects purement géotechniques, mais elle intègre également des considérations économiques, sociales et environnementales, afin de garantir un développement équilibré du territoire. Par exemple, une zone présentant de bonnes caractéristiques géotechniques mais située dans un espace écologique sensible peut être classée avec des restrictions particulières. Alors que certaines

zones peuvent être prioritaires en raison de leur position stratégique ou de leur proximité avec des infrastructures existantes.

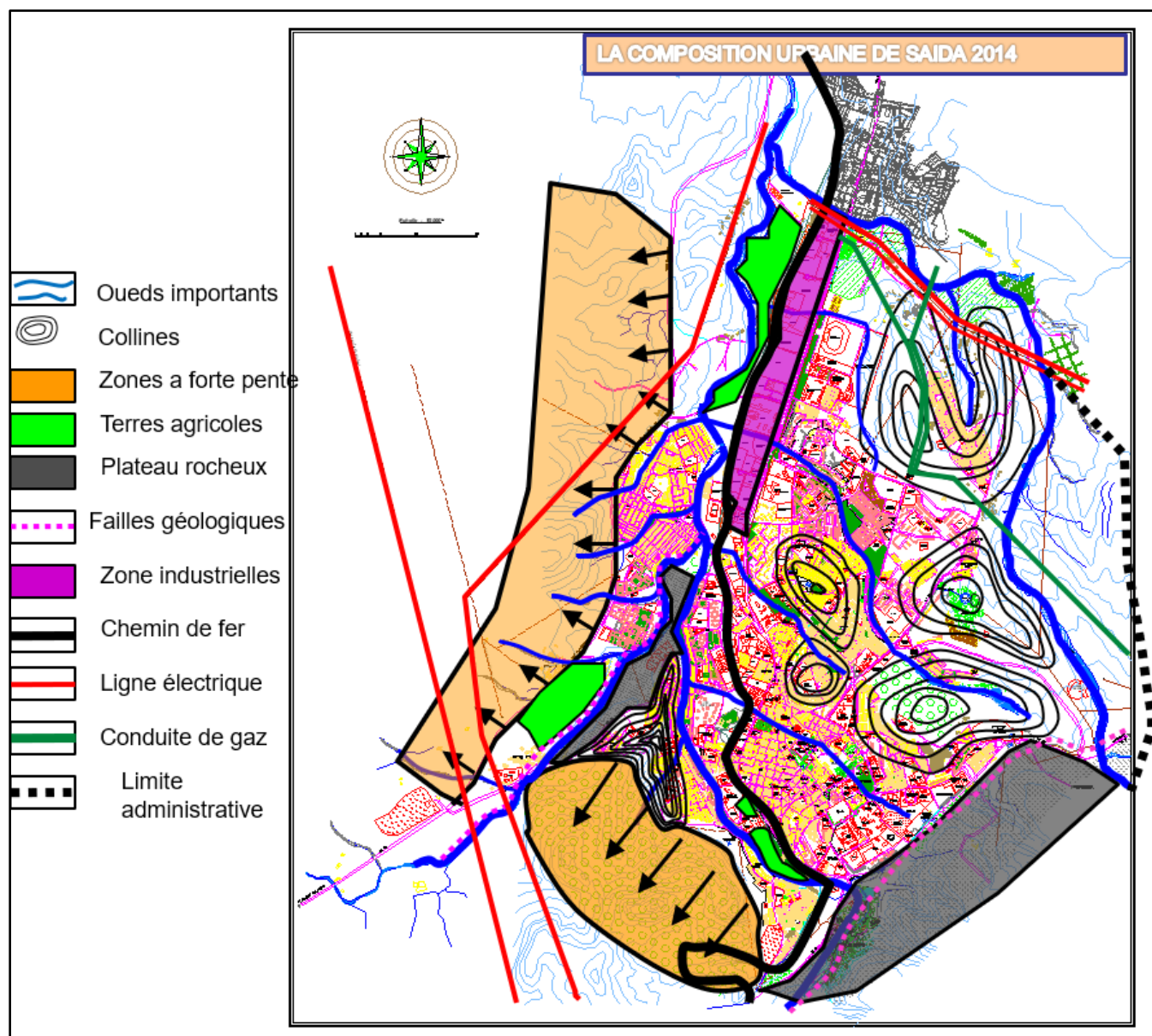


Figure 16: Carte de composition urbaine de la ville de Saïda, PDAU 2014. [40]

En toute état de cause, la hiérarchisation des zones d'aménagement permet d'optimiser l'utilisation de l'espace en orientant les projets vers les secteurs les plus appropriés. Elle contribue à réduire les risques, à améliorer l'efficacité des investissements et à assurer une planification territoriale cohérente, durable et rationnelle.

III.2.4. Aide à la prise de décision

L'aménagement de l'espace est processus complexe impliquant différents acteurs de l'aménagement et de la construction. L'aide à la prise de décision qu'incombe aux responsables publics constitue l'un des apports majeurs des cartes géotechniques dans le domaine de la planification territoriale.

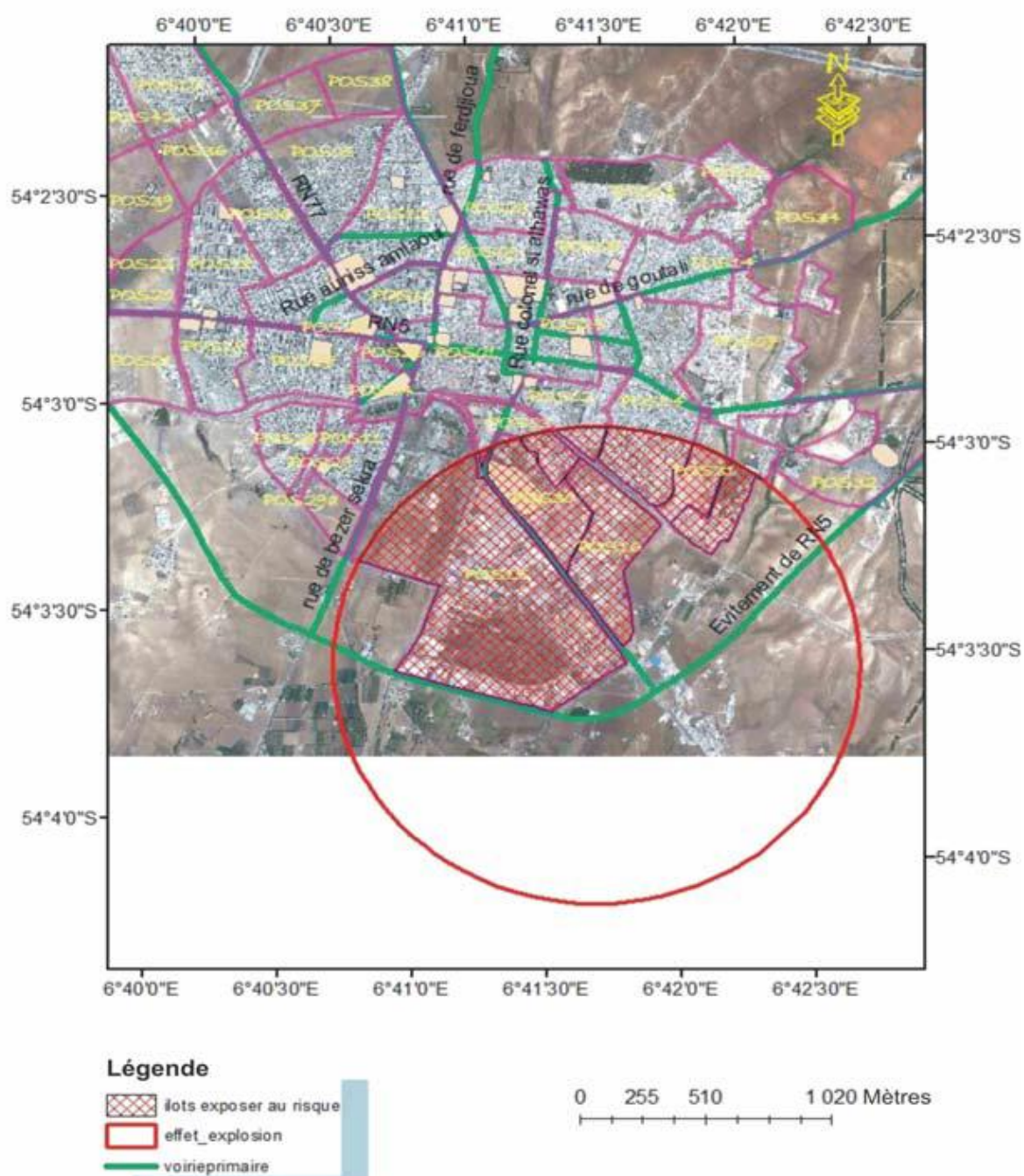


Figure 17: Carte d'exposition au risque d'explosion, cas du centre enfuteur El-Eulma, PDAU 2008. [38]

Elle désigne l'ensemble des mécanismes et outils permettant aux décideurs, aux urbanistes et aux ingénieurs de fonder leurs choix sur des données techniques, objectives, fiables et scientifiquement interprétées. Les cartes géotechniques jouent un rôle crucial en transformant des données complexes issues de sources multiples (investigations de terrain, campagne de reconnaissance de sol, analyses de laboratoire) en informations synthétiques et directement exploitables.

La prise de décision en matière d'aménagement du territoire implique généralement la sélection entre plusieurs alternatives d'implantation, de conception de projets ou de scénarios d'aménagement. Plusieurs paramètres doivent être tenu en compte dans ces choix, notamment les contraintes géotechniques, les risques naturels, les coûts de réalisation et les impacts environnementaux. Les cartes géotechniques permettent d'intégrer ces différents éléments en offrant une représentation spatiale claire des conditions du sous-sol, facilitant ainsi la comparaison entre les différentes zones du territoire. Ainsi, les décideurs peuvent anticiper les problèmes potentiels liés à la nature des sols, tels que les instabilités, les tassements ou les difficultés de drainage. Cette anticipation permet d'adopter des solutions techniques adaptées dès la phase de conception, réduisant ainsi les risques d'erreurs, de retards ou de surcoûts lors de la réalisation des projets.

L'aide à la prise de décision fournie par les cartes géotechniques constitue un élément stratégique pour garantir la cohérence, la sécurité et la durabilité des projets d'aménagement. Elle permet de réduire l'incertitude, d'améliorer la qualité des choix effectués et de favoriser un développement territorial mieux maîtrisé et plus efficace.

III.2.5. Gestion et prévention des risques géotechniques

La gestion et la prévention des risques géotechniques constituent un axe fondamental dans l'aménagement du territoire, car elles visent à réduire les impacts des phénomènes naturels et des instabilités du sol sur les infrastructures et les populations. Les risques géotechniques regroupent l'ensemble des événements liés au comportement mécanique et hydrologique des sols, susceptibles de provoquer des dommages matériels, des pertes économiques ou des atteintes à la sécurité des personnes. Dans ce contexte, les cartes géotechniques représentent un outil indispensable pour identifier, analyser et anticiper ces risques.

La prévention des risques repose avant tout sur une connaissance précise des caractéristiques du sous-sol et de leur variabilité spatiale. Les données issues des investigations de terrain, des essais en laboratoire et des modèles géotechniques permettent de déterminer les zones sensibles et d'évaluer le degré de danger associé à chaque secteur du territoire. Cette approche préventive est essentielle pour éviter l'implantation d'infrastructures dans des zones instables ou à forte contrainte.

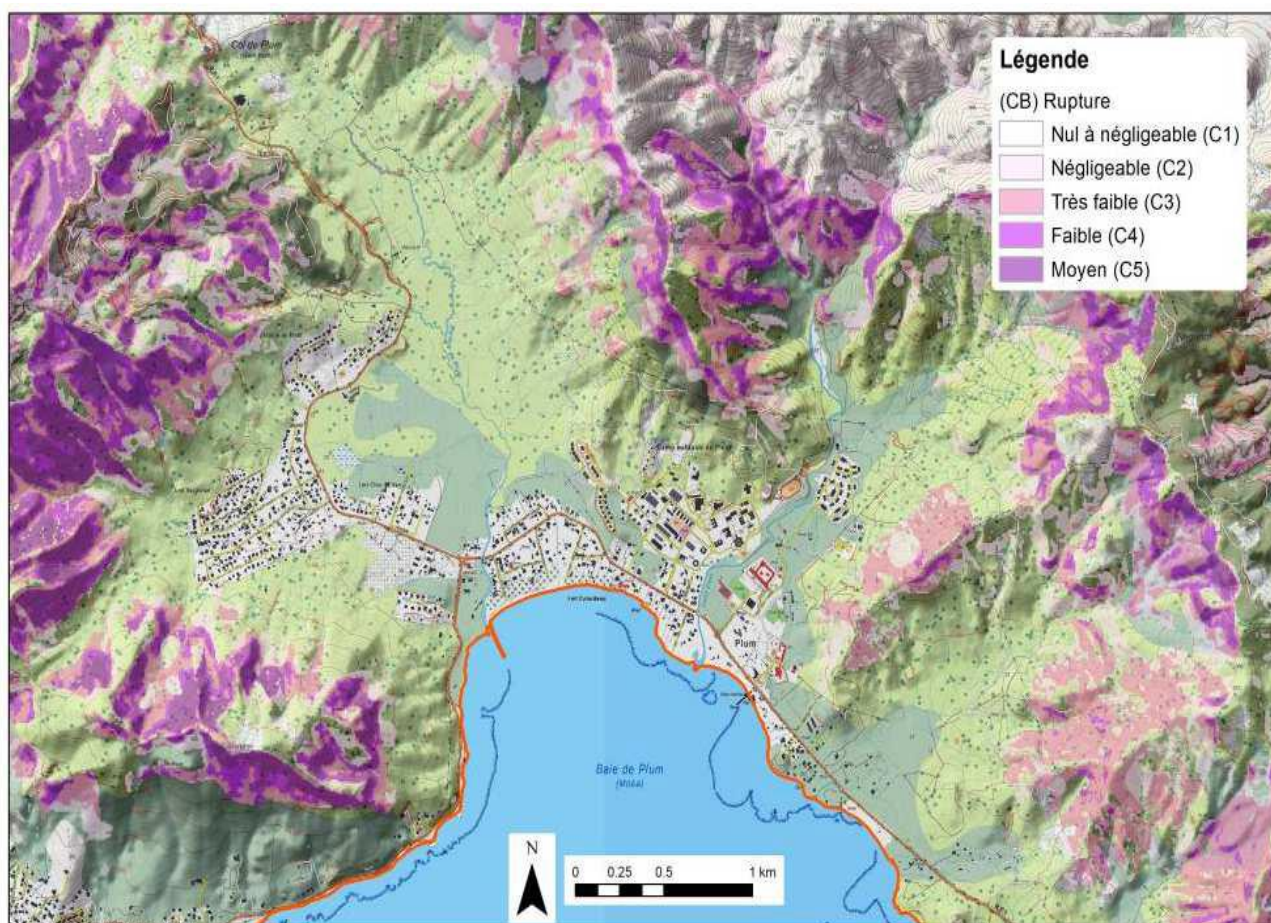


Figure 18: Carte d'Aléa de rupture, commune du Mont-Dore pour les chutes de blocs.[41]

La gestion des risques géotechniques implique également la mise en place de stratégies d'aménagement adaptées. Cela peut inclure le choix de techniques de construction spécifiques, telles que le renforcement des sols, l'utilisation de fondations profondes ou la mise en œuvre de systèmes de drainage efficaces. Ces mesures techniques permettent de réduire la vulnérabilité des ouvrages face aux phénomènes naturels et d'améliorer leur stabilité à long terme. Par ailleurs, les cartes géotechniques facilitent la hiérarchisation des zones à risque en fonction de leur intensité et de leur probabilité d'occurrence. Elles permettent ainsi d'identifier les secteurs nécessitant une surveillance particulière, des études complémentaires ou des

restrictions d'urbanisation. Cette classification constitue une base essentielle pour les autorités chargées de la planification et de la gestion des territoires.

La gestion des risques géotechniques s'inscrit dans une démarche globale de développement durable et de sécurité territoriale. Elle vise non seulement à protéger les infrastructures existantes et futures, mais également à préserver les populations et à limiter les impacts environnementaux. En ce sens, les cartes géotechniques jouent un rôle stratégique en fournissant une vision plus claire et structurée des risques, facilitant ainsi la prise de décision et la mise en œuvre de mesures de prévention efficaces.

III.2.5.1. Identification des zones à risques

L'identification des zones à risques consiste à localiser, analyser et caractériser les secteurs du territoire susceptibles d'être affectés par des phénomènes d'instabilité liés aux propriétés du sol et aux conditions environnementales.

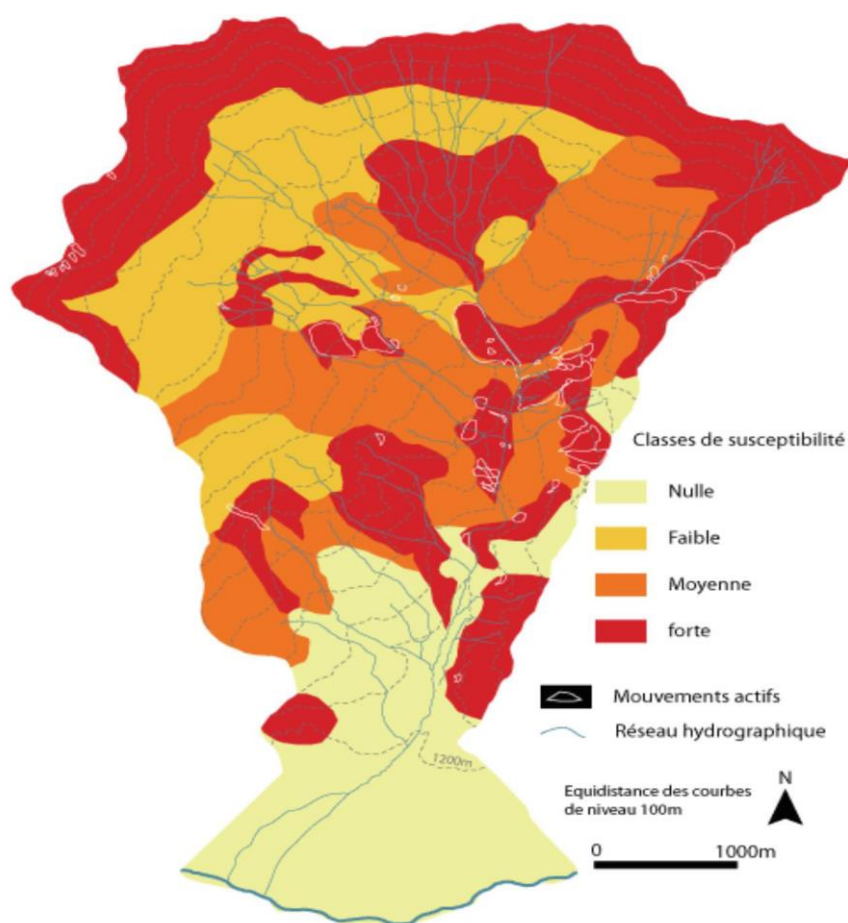


Figure 19 : Carte de susceptibilité aux « mouvements de versants » (Riou-Bourdoux) (In J. PHILIPPE MALET, Strasbourg, 2009). [42]

Cette démarche repose sur l'exploitation combinée des données issues des investigations de terrain, des analyses en laboratoire et des cartes géotechniques, afin d'obtenir une vision précise et fiable de la répartition spatiale des risques.

Les zones à risques sont déterminées à partir de plusieurs indicateurs géotechniques et géomorphologiques. Parmi les principaux facteurs figurent la nature des sols, la pente du terrain, la présence d'eau souterraine, ainsi que les conditions de drainage. Par exemple, les sols argileux saturés en eau sont particulièrement sensibles aux phénomènes de glissement et de retrait-gonflement, tandis que les terrains en pente forte présentent un risque élevé d'instabilité gravitaire. De même, les zones alluviales ou mal drainées sont souvent exposées aux inondations et aux affaissements.

L'identification des zones repose également sur l'analyse des événements passés et des données historiques. Les traces de glissements anciens, d'inondations récurrentes ou d'affaissements permettent de mieux comprendre le comportement du terrain et d'anticiper les risques futurs. Cette approche rétrospective est essentielle pour améliorer la fiabilité des prévisions et orienter les décisions d'aménagement de l'espace. Les cartes géotechniques jouent un rôle fondamental dans cette étape, car elles permettent de représenter spatialement les différents niveaux de risque. Grâce à une classification adaptée, les zones peuvent être distinguées selon leur degré de dangerosité, allant des secteurs stables aux zones fortement exposées nécessitant des mesures de protection ou des restrictions d'urbanisation. Cette représentation cartographique facilite la lecture globale du territoire et l'identification rapide des zones sensibles.

L'identification des zones à risques constitue une base indispensable pour toute stratégie de prévention géotechnique. Elle permet de réduire les incertitudes, d'améliorer la sécurité des projets d'aménagement et de guider les décisions vers une utilisation plus rationnelle et sécurisée du territoire.

III.2.5.2. Prévention des glissements de terrain

La prévention des glissements de terrain constitue un enjeu majeur dans la gestion des risques géotechniques, en raison des impacts importants que ce phénomène peut avoir sur les infrastructures, les habitations et la sécurité des populations. Les glissements de terrain correspondent à des mouvements de masses de sols ou de roches le long d'une surface de

rupture, généralement sous l'effet de la gravité, souvent aggravés par la présence d'eau, la nature des matériaux et la pente du terrain.

Plusieurs facteurs contribuent à l'apparition des glissements de terrain, notamment la nature argileuse de certains sols, la forte inclinaison des versants, les variations hydrologiques et les interventions humaines telles que les terrassements ou la déforestation. L'accumulation d'eau dans les sols réduit leur résistance au cisaillement, ce qui augmente considérablement le risque de rupture. Ainsi, la gestion des eaux de surface et souterraines constitue un élément fondamental de la prévention.

La prévention de ce type de risque repose avant tout sur une identification précise des zones susceptibles d'être instables. Les cartes géotechniques permettent la localisation des pentes critiques, les sols sensibles au cisaillement et les zones présentant une saturation en eau importante. La caractérisation du comportement mécanique des sols est basée sur des informations issues des investigations de terrain, des essais in situ et des analyses de laboratoire.

Les mesures préventives peuvent être de nature technique ou réglementaire :

- Sur le plan technique, elles incluent la stabilisation des pentes par des ouvrages de soutènement, le drainage des sols, la réduction des charges en tête de pente ou encore le reprofilage des versants. Ces solutions visent à améliorer la stabilité globale du terrain et à réduire les forces motrices responsables des glissements.
- Sur le plan de la planification territoriale, la prévention passe également par une limitation ou une interdiction de construction dans les zones à forte instabilité. Les cartes géotechniques permettent d'intégrer ces contraintes dès la phase de planification, en orientant les projets vers des zones plus stables et en évitant les secteurs à risque élevé.

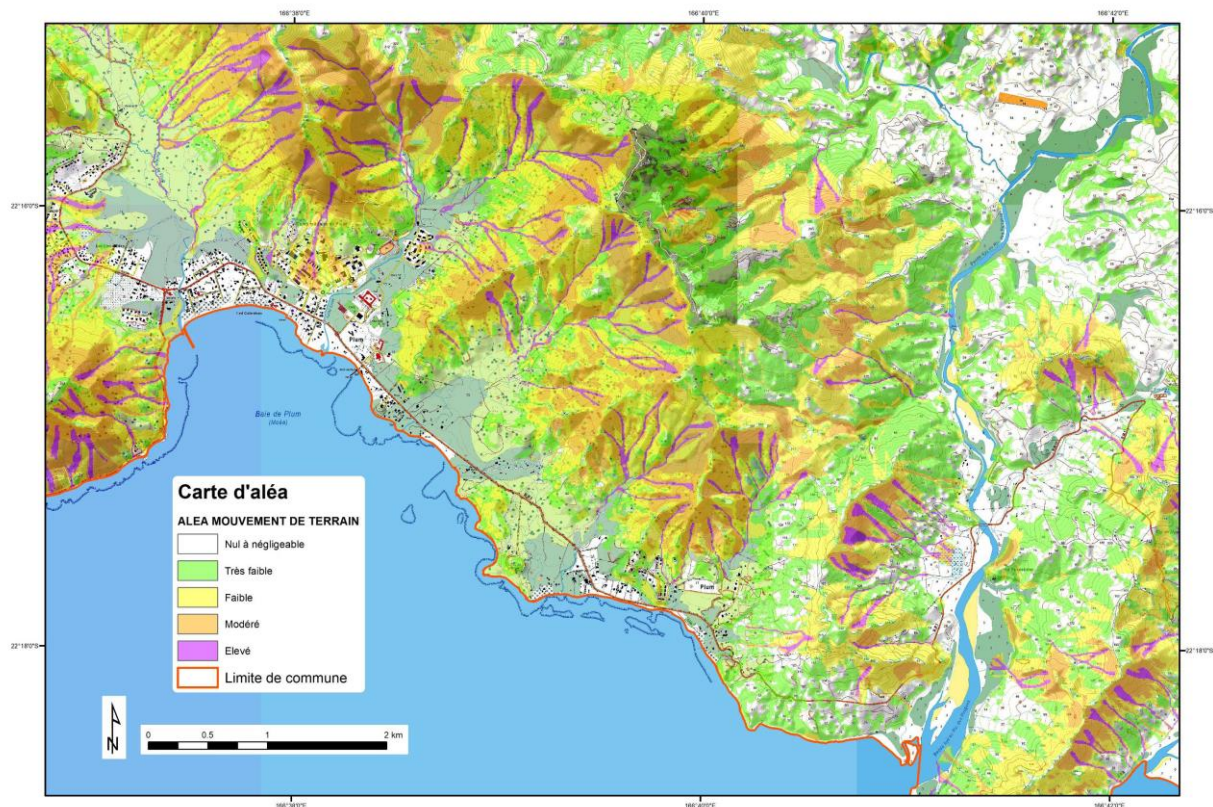


Figure 20 : Carte d’Aléa de mouvement de terrain, commune du Mont-Dore, (Nouvelle Calédonie). [41]

La prévention des glissements de terrain repose sur une combinaison d’analyses géotechniques, d’outils cartographiques et de mesures d’aménagement adaptées. Elle permet de réduire significativement les risques, d’assurer la sécurité des infrastructures et de garantir une utilisation durable et maîtrisée du territoire.

III.2.5.3. Gestion des risques d’inondation

La gestion des risques d’inondation constitue un volet essentiel dans l’aménagement du territoire. Ce type de risque représente l’un des phénomènes naturels les plus fréquents et les plus destructeurs, capables d’affecter simultanément les infrastructures, les activités économiques et les populations. Elles résultent généralement d’un excès d’eau dépassant la capacité d’absorption ou d’évacuation des sols et des systèmes hydrologiques, en lien avec des facteurs climatiques, topographiques et géotechniques.

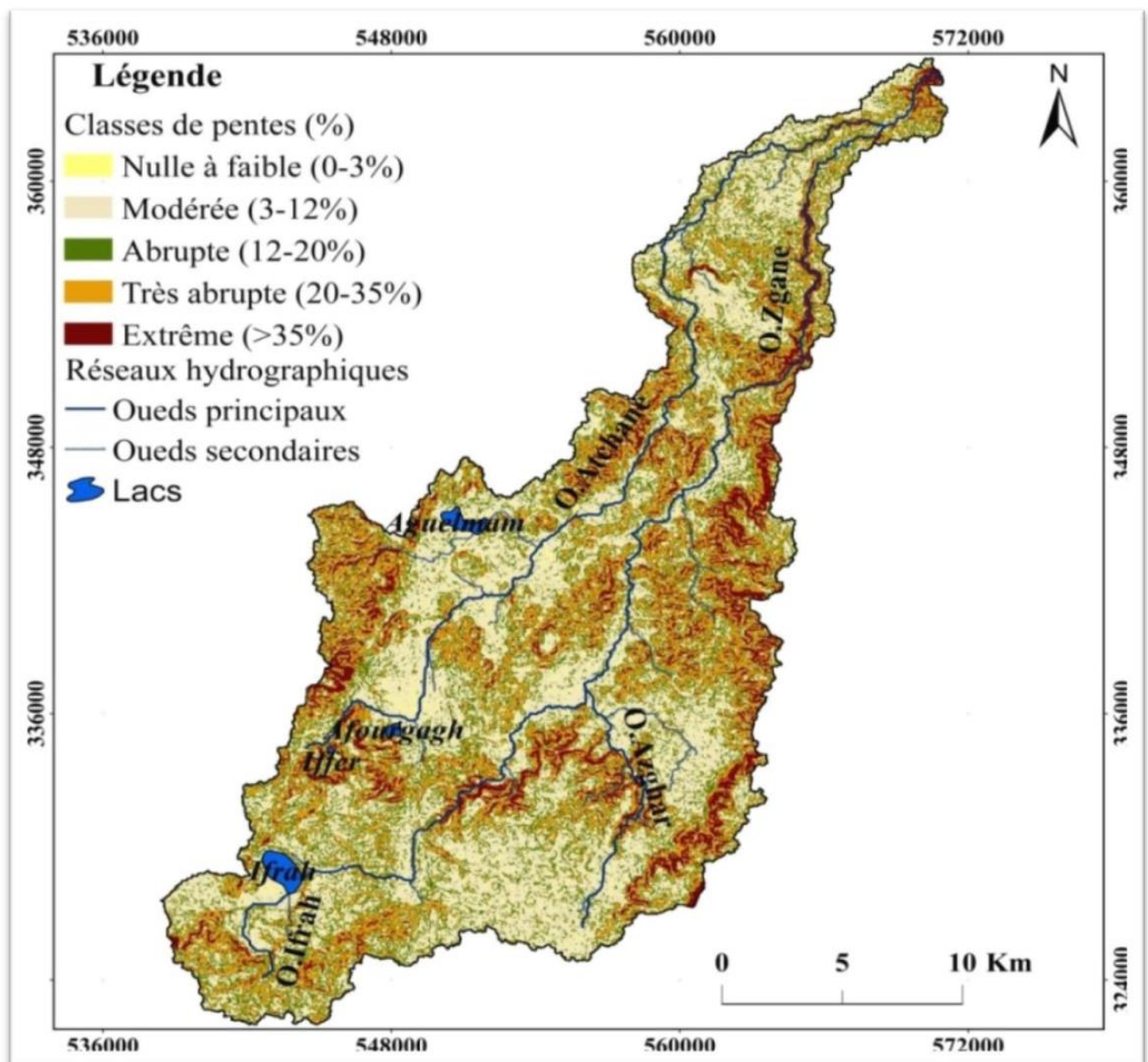


Figure 21 : Carte des zones vulnérables à l'érosion hydrique (H. OUSMANA et al, 2017).[43]

L'analyse géotechnique est déterminante dans l'identification des zones inondables. Elle permet de mettre en évidence les secteurs à faible perméabilité, les zones alluviales, les plaines d'inondation ainsi que les terrains mal drainés. Ces informations sont issues de l'étude des propriétés hydrauliques des sols, notamment leur perméabilité, leur porosité et leur capacité d'infiltration. La présence d'une nappe phréatique proche de la surface constitue également un facteur aggravant, augmentant le risque de saturation du sol et de débordement en cas de fortes précipitations.

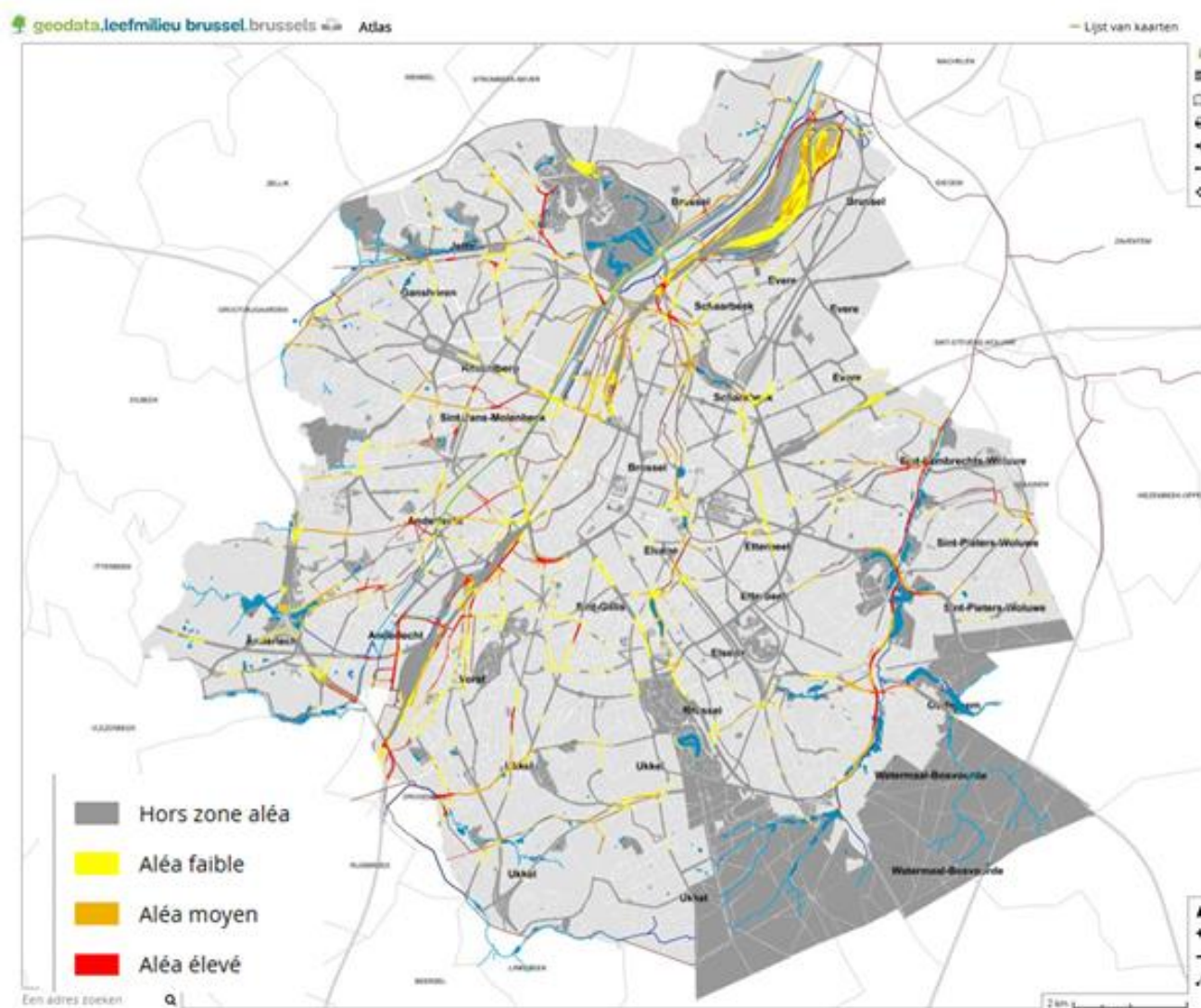


Figure 22 : Carte des risques, Région de Bruxelles-Capitale 2020. [44]

La gestion des risques d'inondation repose donc sur une approche intégrée combinant prévention, planification et aménagement. Sur le plan préventif, l'identification des zones à risque permet de limiter ou d'interdire les constructions dans les secteurs les plus exposés. Cette mesure est essentielle pour réduire la vulnérabilité des infrastructures et des populations face aux crues.

Sur le plan technique, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre afin de réduire l'impact des inondations. Il s'agit notamment de l'amélioration du drainage des sols, de la construction de bassins de rétention, de la canalisation des eaux pluviales et de la protection des berges. Ces aménagements permettent de contrôler les flux d'eau et de limiter les accumulations dangereuses en surface.

Les cartes géotechniques compilant hydrographie et géotechniques permettent d'intégrer les risques d'inondation dans la planification urbaine. Elles facilitent la délimitation des zones constructibles et non constructibles, ainsi que l'orientation des projets vers des secteurs mieux adaptés. Cette approche contribue à une gestion plus rationnelle de l'espace et à une réduction significative des impacts économiques et humains liés aux inondations.

La gestion des risques d'inondation repose sur une compréhension approfondie du comportement hydrique des sols et sur une utilisation efficace des outils de cartographie géotechnique. Elle permet d'assurer une meilleure sécurité des aménagements et de favoriser un développement territorial durable et résilient.

III.2.5.4. Prévention des tassements et affaissements

Les phénomènes de tassements et d'affaissements peuvent compromettre la stabilité des ouvrages et entraîner des désordres structurels importants. La prévention de ces phénomènes constitue un aspect essentiel de la gestion des risques géotechniques. Les tassements correspondent à une diminution progressive du volume des sols sous l'effet des charges appliquées, tandis que les affaissements peuvent être plus brutaux et résulter de la présence de vides, de sols compressibles ou de phénomènes de déstructuration du terrain. Ces types de risques sont fortement liés aux caractéristiques mécaniques des sols, notamment leur compressibilité, leur teneur en eau, leur degré de consolidation et leur structure interne. Les sols fins, tels que les argiles et certains limons, sont particulièrement sensibles aux tassements en raison de leur faible perméabilité et de leur comportement différé sous charge. À l'inverse, les sols mal compactés ou hétérogènes peuvent provoquer des tassements différentiels, responsables de fissures et de déformations des bâtiments.

L'identification des zones susceptibles de présenter ces risques repose sur l'analyse des données géotechniques issues des forages, des essais in situ et des essais de laboratoire. Les cartes géotechniques permettent de localiser les secteurs présentant des sols compressibles, des remblais récents ou des formations instables. Elles jouent ainsi un rôle fondamental dans l'évaluation préalable des terrains avant toute construction.

La prévention des tassements et affaissements repose sur plusieurs approches techniques. L'une des principales mesures consiste à améliorer les caractéristiques du sol par des techniques de compactage, de préchargement ou de substitution des matériaux. Dans certains cas, l'utilisation

de fondations profondes, telles que les pieux, permet de transférer les charges vers des couches de sol plus résistantes et stables. Le drainage des sols peut également être utilisé pour accélérer la consolidation et réduire les déformations à long terme.

Sur le plan de la planification, l'intégration des cartes géotechniques permet d'éviter l'implantation de constructions lourdes dans les zones à forte compressibilité. Elle contribue également à adapter les types de structures en fonction des conditions du sol, en limitant les risques de désordres futurs. Cette approche préventive permet de réduire significativement les coûts de réparation et d'entretien des ouvrages.

En conclusion, la prévention des tassements et des affaissements repose sur une bonne connaissance des propriétés mécaniques des sols et sur une exploitation efficace des outils géotechniques. Elle constitue une étape indispensable pour garantir la stabilité, la durabilité et la sécurité des infrastructures dans le cadre de l'aménagement du territoire.

III.2.6. Application dans la planification des infrastructures

L'application des cartes géotechniques dans la planification des infrastructures constitue une étape déterminante dans le processus d'aménagement du territoire. Elle permet d'intégrer les données relatives aux caractéristiques du sol et du sous-sol dès la phase de conception des projets, afin d'assurer leur faisabilité technique, leur stabilité et leur durabilité. Les infrastructures concernées peuvent inclure les bâtiments, les routes, les ponts, les réseaux d'assainissement ainsi que les zones industrielles et résidentielles.

La planification des infrastructures nécessite une connaissance approfondie des conditions géotechniques du site, notamment la capacité portante des sols, leur homogénéité, leur perméabilité et leur comportement face aux charges. Les cartes géotechniques fournissent une représentation spatiale de ces paramètres, permettant ainsi de comparer les différents sites potentiels et de sélectionner les zones les plus adaptées à chaque type d'ouvrage. Cette approche contribue à réduire les incertitudes et à améliorer la qualité des décisions d'implantation.

L'un des principaux apports des cartes géotechniques dans ce domaine est l'optimisation du choix des sites de construction. En identifiant les zones stables et bien drainées, elles permettent d'éviter les terrains instables ou présentant des risques élevés de tassement, de glissement ou d'inondation. Cette sélection préalable est essentielle pour garantir la sécurité des ouvrages et limiter les interventions correctives coûteuses après la construction.

Par ailleurs, les cartes géotechniques jouent un rôle important dans l'adaptation des techniques de construction aux conditions du terrain. En fonction des caractéristiques du sol, il est possible de définir le type de fondations le plus approprié, qu'il s'agisse de fondations superficielles ou profondes. Elles permettent également de prévoir les besoins en travaux de terrassement, de drainage ou de stabilisation, afin d'assurer une meilleure adéquation entre le projet et le milieu naturel.

En outre, leur utilisation contribue à l'optimisation des coûts de construction. En réduisant les risques liés aux imprévus géotechniques, elles permettent de limiter les surcoûts liés aux modifications de conception, aux réparations ou aux retards de chantier. Cette anticipation des contraintes constitue un avantage économique majeur dans la gestion des projets d'infrastructure.

Enfin, les cartes géotechniques permettent d'éviter les conséquences négatives liées à l'absence d'études préalables du sol, telles que les fissurations, les affaissements ou les défaillances structurelles. Elles représentent ainsi un outil indispensable pour garantir la sécurité, la performance et la durabilité des infrastructures dans le cadre de l'aménagement du territoire.

III.2.7. Choix des sites de construction

Le choix des sites de construction constitue une étape fondamentale dans la planification des infrastructures. Les cartes géotechniques, constitue une démarche stratégique, dans le choix des sites d'implantation de constructions visant à optimiser l'utilisation de l'espace, à réduire les risques structurels et à garantir la durabilité des projets d'infrastructure. Il représente une étape clé dans la réussite de tout projet d'aménagement. Il s'agit de sélectionner, parmi plusieurs alternatives, les terrains les plus adaptés à l'implantation des projets en fonction de leurs caractéristiques géotechniques, topographiques, hydrologiques et environnementales. Les cartes géotechniques représentent un outil essentiel d'aide à la décision, permettant une analyse objective et spatialisée des conditions du sous-sol.

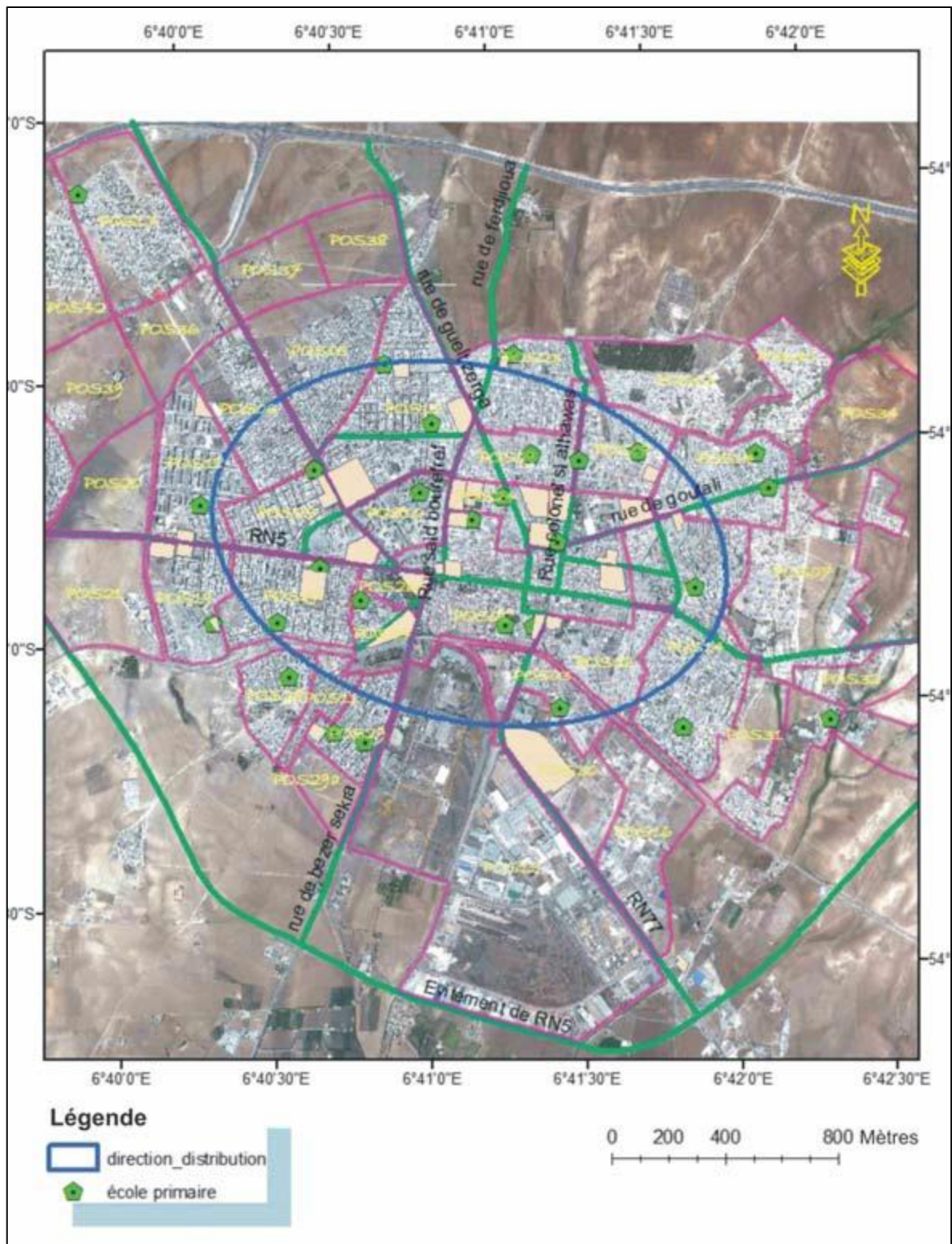


Figure 23 : Carte de distribution des équipements de base (école primaire), ville d'El-Eulma, PDAU 2008. [38]

Le choix du site repose principalement sur l'évaluation de la qualité géotechnique des sols. Les paramètres les plus importants incluent la capacité portante, la compacité, la nature lithologique, la perméabilité ainsi que la sensibilité aux phénomènes d'instabilité tels que les

glissements, les tassements ou les affaissements. Les terrains présentant des sols homogènes, stables et bien drainés sont généralement privilégiés pour l'implantation des constructions, tandis que les zones instables ou fortement contraintes sont évitées ou soumises à des traitements spécifiques.

Les cartes géotechniques facilitent une visualisation plus claire de la répartition spatiale des caractéristiques géotechniques, facilitant ainsi la comparaison entre différents sites potentiels. Elles offrent une représentation synthétique des zones favorables, conditionnelles ou défavorables à la construction. Cette classification permet aux ingénieurs et aux urbanistes de prendre des décisions basées sur des données scientifiques fiables, réduisant ainsi les incertitudes liées à l'hétérogénéité du terrain.

Par ailleurs, le choix des sites de construction ne dépend pas uniquement des conditions géotechniques : la topographie, l'accessibilité, la proximité des réseaux d'infrastructures existants, ainsi que les contraintes environnementales et réglementaires sont également des facteurs à prendre en considération dans les choix d'implantation des projets d'urbanisme. L'intégration de ces différents critères permet d'assurer une cohérence globale entre les exigences techniques et les objectifs d'aménagement du territoire.

III.2.8. Adaptation des fondations aux conditions du sol

L'adaptation des fondations aux conditions du sol constitue un élément clé de la réussite des projets d'infrastructure, garantissant la sécurité, la stabilité et la durabilité des ouvrages dans le cadre de l'aménagement du territoire. Elle vise à assurer la transmission des charges de la structure vers le terrain de manière stable, sûre et durable, en tenant compte des caractéristiques géotechniques spécifiques du site. Les cartes géotechniques permettent d'identifier la nature des sols, leur capacité portante, leur compressibilité ainsi que leur comportement sous l'effet des charges.

Le choix du type de fondation dépend directement des propriétés mécaniques du sol. Dans les cas où les sols présentent une bonne résistance et une faible compressibilité, des fondations superficielles telles que les semelles isolées, les semelles filantes ou les radiers peuvent être utilisées. Ces solutions sont généralement économiques et adaptées aux terrains homogènes et stables. En revanche, lorsque les sols sont faibles, hétérogènes ou compressibles, il devient

nécessaire de recourir à des fondations profondes, comme les pieux ou les puits, afin de transférer les charges vers des couches plus résistantes situées en profondeur.

L'utilisation des cartes géotechniques permet d'anticiper ces choix dès la phase de planification. En représentant spatialement les variations de la nature des sols et de leurs propriétés, elles facilitent l'identification des zones nécessitant des solutions de fondation spécifiques. Cette approche réduit les risques d'erreurs de conception et améliore la fiabilité des ouvrages. L'adaptation des fondations implique également la prise en compte des risques géotechniques relatifs aux tassements différentiels, les affaissements ou les problèmes de portance. Dans certains cas, des techniques d'amélioration des sols peuvent être mises en œuvre, comme les techniques de compactage, la stabilisation chimique ou le drainage, afin d'améliorer les conditions du terrain avant la construction. Cette adaptation contribue à optimiser les coûts et la durabilité des projets. Une bonne adéquation entre le type de fondation et les caractéristiques du sol permet de réduire les interventions correctives, d'augmenter la durée de vie des structures et d'assurer leur performance à long terme.

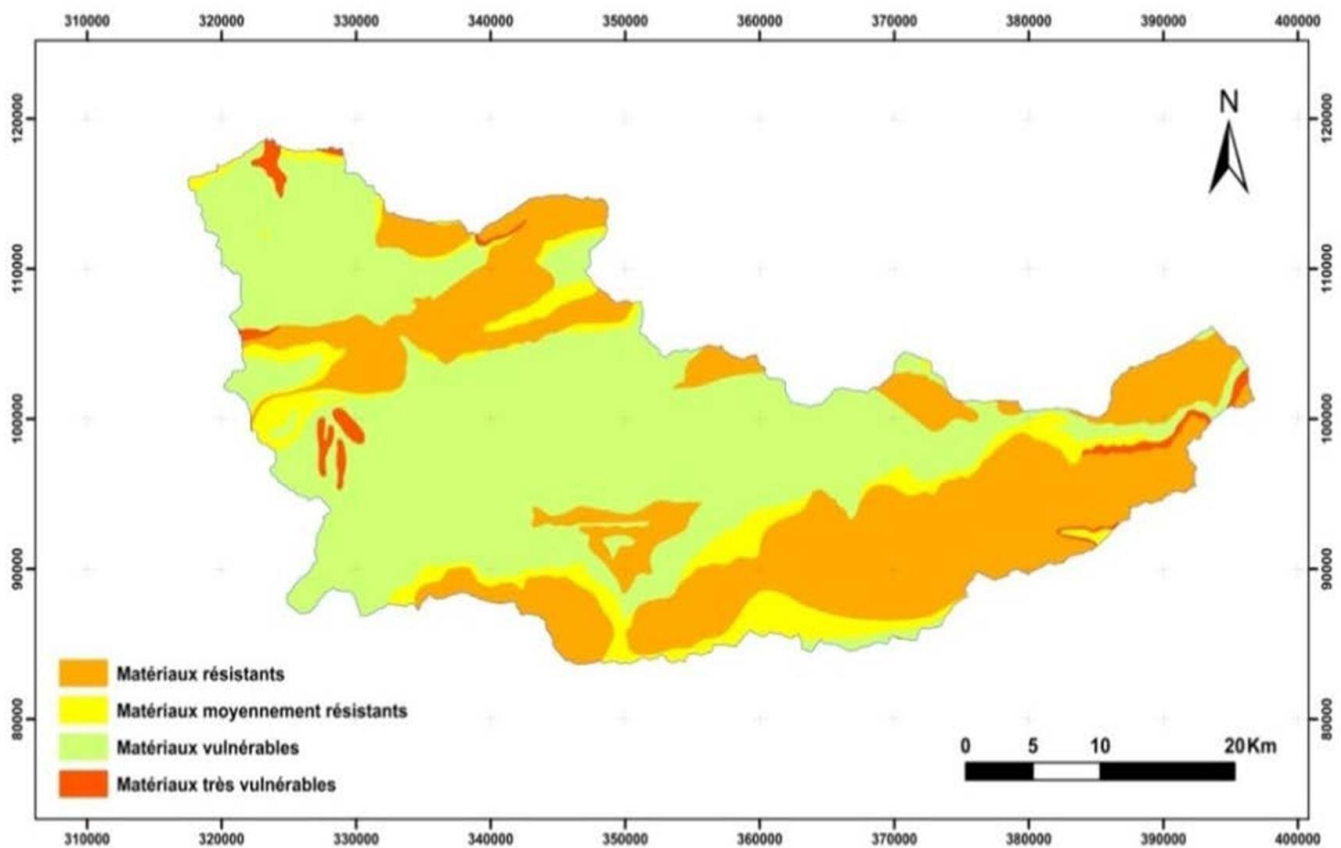


Figure 24 : Carte de la friabilité des matériaux (A.Elaloui et al, 2015). [45]

III.2.9. Planification des infrastructures de transport

La planification des infrastructures de transport est un axe majeur de l'aménagement du territoire. Elle concerne la mobilité des personnes et des marchandises ainsi que le développement économique des régions. Elle englobe la conception et la réalisation des réseaux routiers, ferroviaires, aéroportuaires et autres systèmes de transport, en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales. Les cartes géotechniques sont un outil essentiel qui fournit des informations précises sur la nature des sols et leur aptitude à supporter les ouvrages linéaires. La réalisation des infrastructures de transport nécessite une analyse approfondie des conditions géotechniques le long des tracés envisagés. La portance des sols, la stabilité des pentes, la compressibilité des terrains et la présence d'eau souterraine influencent directement le choix du tracé et les techniques de mise en œuvre.

Les cartes géotechniques permettent ainsi d'identifier les zones favorables au passage des infrastructures et d'éviter les secteurs instables ou à risque élevé. La qualité du sol conditionne la durabilité de la chaussée et la fréquence des opérations de maintenance des routes et autoroutes. Les terrains compressibles ou sujets aux tassements peuvent entraîner des déformations de la chaussée, tandis que les zones en pente forte peuvent augmenter les risques de glissements. Grâce aux cartes géotechniques, il est possible d'anticiper ces problèmes et d'adapter le tracé ou les techniques de renforcement du sol.

Pour les infrastructures ferroviaires, les exigences sont encore plus strictes, car la stabilité du sol doit garantir une grande précision géométrique et une résistance élevée aux charges dynamiques. Les cartes géotechniques permettent d'identifier les zones nécessitant des traitements spécifiques du sol ou des ouvrages de stabilisation tels que les remblais renforcés ou les fondations profondes. De même, la planification des pistes et des zones de circulation dans le cas des ouvrages aéroportuaires, repose sur une excellente connaissance des caractéristiques géotechniques afin d'assurer la sécurité des avions et la résistance aux charges importantes. Les zones mal adaptées doivent être évitées ou améliorées par des techniques de traitement du sol.

La planification des infrastructures de transport, appuyée par les cartes géotechniques, permet d'optimiser le tracé des ouvrages, de réduire les risques techniques et d'améliorer la durabilité des réseaux de transport. Elle constitue un élément fondamental pour garantir une mobilité efficace et un développement territorial équilibré.

III.3. Impact sur l'organisation urbaine

L'impact des cartes géotechniques sur l'organisation urbaine est considérable, elles influencent directement la structuration de l'espace, la répartition des fonctions urbaines et la localisation des infrastructures. En intégrant les données relatives aux caractéristiques des sols et aux risques naturels, elles permettent d'orienter le développement urbain vers des zones adaptées, tout en évitant les secteurs instables ou dangereux. Cette approche contribue à une urbanisation plus rationnelle, sécurisée et durable.

L'un des principaux effets des cartes géotechniques est la hiérarchisation de l'espace urbain. Les zones présentant de bonnes conditions géotechniques sont généralement réservées aux constructions denses, aux équipements publics et aux infrastructures lourdes, tandis que les zones moins favorables sont destinées à des usages limités, tels que les espaces verts, les zones agricoles ou les secteurs à faible densité. Cette répartition permet d'optimiser l'utilisation du territoire en fonction de ses capacités réelles.

Les cartes géotechniques influencent fortement le tracé et la localisation des réseaux d'infrastructures. Les routes, les réseaux d'assainissement, les lignes ferroviaires et autres équipements linéaires sont planifiés en tenant compte des contraintes du sol afin de minimiser les coûts de construction et les risques de dégradation. Cela permet également de réduire les interventions de maintenance et d'améliorer la durabilité des infrastructures urbaines.

Elles contribuent également à la prévention des risques dans l'organisation urbaine. En identifiant les zones exposées aux glissements de terrain, aux inondations ou aux tassements, elles permettent d'éviter l'urbanisation de ces secteurs ou d'y imposer des mesures de protection spécifiques. Cette démarche renforce la résilience des villes face aux aléas naturels et améliore la sécurité des populations.

En outre, l'intégration des cartes géotechniques favorise une meilleure cohérence entre les différentes composantes de la ville. Elle permet d'harmoniser le développement résidentiel, industriel et commercial avec les contraintes naturelles du terrain, réduisant ainsi les conflits d'usage et les déséquilibres spatiaux.

Les cartes géotechniques jouent un rôle stratégique dans l'organisation urbaine en guidant les choix d'aménagement, en optimisant la répartition des fonctions urbaines et en garantissant un développement plus sûr et plus équilibré des territoires.

III.4. Conséquences de l'absence d'études géotechniques

L'absence d'études géotechniques préalables constitue l'une des principales causes de désordres dans les projets de construction et des choix en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme. En effet, la méconnaissance des caractéristiques du sol et du sous-sol peut entraîner des choix inadaptés en matière de choix d'implantation, de conception et de dimensionnement des ouvrages, ce qui compromet directement leur stabilité, leur sécurité et leur durabilité.

L'une des premières conséquences observées est l'apparition de pathologies structurelles au niveau des constructions. Les pathologies structurelles (tassements différentiels, fissurations des bâtiments, affaissements de terrain, déformations des infrastructures) sont souvent liées à une mauvaise appréciation de la portance du sol. Dans les cas les plus graves, cela peut conduire à l'effondrement partiel ou total des ouvrages, avec des risques importants pour les populations.

Sur le plan économique, l'absence d'études géotechniques entraîne également des surcoûts significatifs. Les réparations, les renforcements de structures ou les reprises de fondations nécessaires pour corriger les erreurs initiales peuvent dépasser largement le coût d'une étude préalable. À cela s'ajoutent les retards de chantier, les interruptions de travaux et les pertes financières liées à l'inefficacité des solutions initialement adoptées. Par ailleurs, cette absence d'analyse du sol augmente considérablement l'exposition aux risques naturels. Les constructions peuvent être implantées dans des zones inondables, instables ou sujettes aux glissements de terrain, sans que ces dangers aient été correctement identifiés. Cela fragilise non seulement les infrastructures, mais aussi la sécurité des habitants et des usagers.

Sur le plan de l'aménagement du territoire, le manque d'études géotechniques conduit à une mauvaise utilisation de l'espace. Des zones potentiellement instables peuvent être urbanisées, tandis que des terrains plus favorables restent inexploités. Cette situation entraîne un déséquilibre dans l'organisation spatiale et compromet la cohérence des politiques de développement.

L'absence d'études géotechniques représente un facteur de risque majeur pour les projets de construction et d'aménagement. Elle engendre des conséquences techniques, économiques et environnementales importantes, et souligne la nécessité d'intégrer systématiquement les analyses géotechniques dans toute démarche de planification territoriale.

III.5. Contraintes réglementaires et juridiques

Les contraintes réglementaires et juridiques constituent un cadre essentiel dans l'intégration des cartes géotechniques aux instruments d'urbanisme et à la planification territoriale. Elles définissent les obligations, les normes et les règles que doivent respecter les acteurs de l'aménagement afin de garantir la sécurité des personnes, la protection de l'environnement et la durabilité des constructions. Dans ce contexte, les études géotechniques ne sont pas seulement un outil technique, mais également une exigence encadrée par la législation en vigueur. En France, le rapport de R. Sanejouand (1972) [29] a dressé un état des lieux de la cartographie géotechnique et de son usage dans les politiques publiques, soulignant son caractère réglementaire croissant.

Sur le plan réglementaire, les projets de construction doivent respecter les dispositions des plans d'urbanisme tels que le PDAU et le POS, qui intègrent progressivement les données issues des études géotechniques. Ces documents imposent des règles précises concernant l'utilisation des sols, les zones constructibles et les restrictions liées aux risques naturels. Ainsi, toute opération d'aménagement doit être conforme aux classifications géotechniques du terrain, notamment en ce qui concerne la stabilité, la portance et la sensibilité aux aléas naturels.

Les contraintes juridiques concernent également l'obligation de réaliser des études géotechniques avant toute construction dans les zones à risque ou pour les ouvrages importants. Cette exigence vise à prévenir les désordres structurels et à limiter les responsabilités en cas de sinistre. En effet, en l'absence d'étude géotechnique, les maîtres d'ouvrage et les constructeurs peuvent être tenus juridiquement responsables des dommages causés par des défauts liés au sol.

Par ailleurs, les normes techniques et les codes de construction jouent un rôle important dans l'encadrement des pratiques. Ils définissent les méthodes d'investigation, les critères de classification des sols ainsi que les règles de conception des fondations et des ouvrages. Le respect de ces normes garantit la fiabilité des études géotechniques et leur intégration correcte dans les projets d'aménagement.

Les cartes géotechniques, en tant qu'outils d'aide à la décision, doivent également répondre à des exigences de précision, de mise à jour et de validation scientifique. Leur utilisation dans les documents d'urbanisme implique une responsabilité institutionnelle, car elles servent de base à des décisions ayant un impact direct sur la sécurité publique et le développement territorial.

Les contraintes réglementaires et juridiques encadrent fortement l'utilisation des cartes géotechniques dans l'aménagement du territoire. Elles assurent la conformité des projets aux normes en vigueur, renforcent la prévention des risques et garantissent une gestion responsable et sécurisée de l'espace urbain et rural.

III.6. Recommandations pratiques pour l'exploitation optimale des cartes géotechniques

III.6.1. Encourager la production et la mise à jour régulière des cartes

Les autorités publiques et privées doivent investir dans des campagnes d'investigation périodiques pour garantir que les cartes géotechniques reflètent fidèlement l'état actuel des sols. Cette actualisation est indispensable pour anticiper les évolutions géologiques et les impacts anthropiques.

III.6.2. Favoriser la formation et la sensibilisation des acteurs territoriaux

Il est important de former urbanistes, aménageurs, décideurs politiques et techniciens à la lecture et à l'interprétation des cartes géotechniques. Une meilleure compréhension facilite leur utilisation dans la planification et la gestion des risques.

III.6.3. Intégrer systématiquement les cartes dans les documents d'urbanisme et les politiques locales

Les cartes géotechniques doivent devenir un élément obligatoire à prendre en compte lors de l'élaboration des plans locaux d'urbanisme (PLU), des schémas d'aménagement, et des études de faisabilité, afin d'orienter les décisions vers des choix durables et sécurisés.

III.6.4. Développer des plateformes numériques collaboratives ouvertes

La création d'outils numériques accessibles et interactifs, qui regroupent les données géotechniques à l'échelle locale ou nationale, facilitera la diffusion, l'exploitation et la mise à jour des informations par l'ensemble des parties prenantes.

III.6.5. Promouvoir la recherche et l'innovation technologique

Encourager le recours aux technologies avancées (drones, modélisation 3D, intelligence artificielle) permet d'améliorer la précision et l'efficacité des cartes. Ce soutien garantit aussi que les méthodes d'étude suivent les avancées scientifiques et environnementales.

Conclusion

L'élaboration des cartes géotechniques et leur intégration dans l'aménagement du territoire montrent clairement leur rôle essentiel dans la planification des espaces et la réalisation des projets d'infrastructure. Grâce à une connaissance approfondie des caractéristiques des sols et des formations géologiques, ces outils permettent d'anticiper les contraintes naturelles et de réduire les incertitudes liées au terrain.

Les cartes géotechniques contribuent à améliorer la qualité des décisions d'aménagement en facilitant l'identification des zones favorables à l'urbanisation, ainsi que des secteurs présentant des risques naturels tels que les glissements de terrain, les inondations ou les tassements. Elles constituent ainsi un support indispensable pour assurer la sécurité des constructions et la durabilité des infrastructures.

L'utilisation des méthodes modernes telles que les SIG, la télédétection, la modélisation numérique et les systèmes d'analyse multicritère a permis d'enrichir considérablement les possibilités d'interprétation et de représentation des données géotechniques. Ces avancées technologiques renforcent la précision des études et facilitent la prise de décision à différentes échelles territoriales. Cependant, malgré leur importance, les cartes géotechniques présentent encore certaines limites liées à l'hétérogénéité des sols, aux incertitudes des données et aux contraintes techniques et financières des investigations. Ces limites soulignent la nécessité d'une interprétation prudente et d'une mise à jour régulière des informations afin de garantir leur fiabilité. En définitive, les cartes géotechniques s'imposent comme un outil stratégique incontournable dans l'aménagement du territoire. Leur contribution au développement durable est majeure, car elles permettent de concilier sécurité, efficacité économique et protection de l'environnement. Elles représentent ainsi un support essentiel pour un développement territorial mieux maîtrisé, plus rationnel et plus durable.

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il apparaît que la cartographie géotechnique constitue un outil essentiel pour une meilleure connaissance du sous-sol et une gestion rationnelle de l'aménagement du territoire. Elle permet d'identifier les caractéristiques géotechniques des terrains, d'évaluer les risques naturels et d'orienter les décisions liées aux projets de construction et d'urbanisme.

L'intégration des techniques modernes, telles que les Systèmes d'Information Géographique, la géostatistique et les outils numériques, a considérablement amélioré la précision et l'efficacité des cartes géotechniques. Ces avancées offrent de nouvelles possibilités pour la planification durable des territoires et la réduction des risques liés aux contraintes du sol. Malgré leur importance, les cartes géotechniques restent dépendantes de la qualité des données disponibles et nécessitent une actualisation régulière afin de refléter l'évolution des conditions naturelles et des aménagements réalisés.

Les perspectives de la cartographie géotechnique s'orientent vers l'utilisation de technologies modernes, telles que les systèmes d'information géographique (SIG), l'intelligence artificielle et les méthodes d'interpolation avancées comme le krigeage bayésien empirique (EBK). L'intégration de bases de données géotechniques et de systèmes de surveillance en temps réel permettra d'améliorer la précision des cartes, d'anticiper les risques géotechniques et de soutenir une planification urbaine plus sûre, durable et adaptée aux défis futurs. À terme, ces cartes pourront être intégrées de manière plus systématique dans les documents de planification urbaine, notamment le PDAU et le POS, afin d'optimiser les décisions d'aménagement et de réduire les risques liés au sol.

En définitive, la cartographie géotechnique représente un support indispensable à la prise de décision. Elle contribue à la sécurité des ouvrages, à l'optimisation des coûts de construction et à la préservation du territoire, tout en favorisant un développement urbain durable et adapté aux contraintes géologiques et géotechniques.

Références bibliographiques

- [1] BRGM (2019). *La cartographie géotechnique pour l'aménagement : principes et applications*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- [2] CGS (2020). *Carte géotechnique numérique de la wilaya de Tlemcen : notice d'utilisation*. Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique, Alger, Algérie.
- [3] Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur (1976). *Guide pour la préparation des cartes géotechniques*. UNESCO, Paris, France.
- [4] Ptolémée (1990). *Géographie* (N. Reed, Trad.). Penguin Classics.
- [5] Harley, J. B., & Woodward, D. (1987). *The History of Cartography* (Vol. 1). University of Chicago Press.
- [6] Bagrow, L. (1985). *History of Cartography*. Prestel.
- [7] Thrower, N. J. W. (2008). *Maps and Civilization* (3^e éd.). University of Chicago Press.
- [8] Rystedt, B. (2006). « Cadastre suédois et cartographie villageoise ». *Scandinavian Journal of History*, 31(2), 120-140.
- [9] Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- [10] Rystedt, B. (2014). « Suède : cadastre et cartographie ». *CFC*, n°221, traduction par Laurent Benosa et Dominique Gresle-Poulligny, France.
- [11] Arnold, M. (1974). « Problème de la cartographie de la géologie de l'ingénieur (cartographie géotechnique) ». *Actes du colloque de géologie de l'ingénieur*, Liège, Belgique, pp. 313-322.
- [12] AMARI Abderrazek & NEKROUF Khaled, Contribution à l'étude de l'effet du stress thermique sur la germination des graines de *Pinus halepensis* Mill., Mémoire Master En Sciences biologiques, 2024, Université de Saida – Dr. MOULAY Tahar.
- [13] Monsour H, (2012) : réseaux hydrographique et succession géologique et géologie du bassin versant de l'oued Saïda Ressource en eau souterraine.
- [14] Van Welden, A. (2007). *Enregistrements sédimentaires imbriqués d'une activité sismique et de changements paléoenvironnementaux*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, France, 297 p.
- [15] Ivain, N. (2005). *La projection cartographique : comment aborder l'étude de la carte en cycle 3*. Nevers, France.

[16] LCPC (2000). *Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain*. Collection Environnement et Risques Naturels, France.

[17] Ziat, L. (2022). *Cartographie géotechnique de la commune d'Azazga*. Mémoire de Master en Génie Civil, option Géotechnique et Environnement, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 91p.

[18] Bekhouch, Y., & Hafnaoui, S. (2022). *Élaboration des cartes géotechniques : étude bibliographique*. Mémoire de Master, Université Larbi Tébessi, Tébessa, Algérie.

[19] Fellenius, W. (1927). *Erdstatische Berechnungen*. Wilhelm Ernst & Sohn.

[20] Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.

[21] Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy.

[22] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.

[23] Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Electric Power Research Institute.

[24] Arnould, M., & Vantroys, M. (1970). « Essai de cartographie géotechnique automatique sur la ville nouvelle d'Évry ». *Premier Congrès International de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, Paris.

[25] Ministère de l'Équipement et du Logement – DAFU (1970). *Recommandations pour la cartographie géotechnique appliquée aux problèmes d'aménagement et d'urbanisme*. France.

[26] Humbert, M. (1972). *Carte géotechnique de Clermont-Ferrand : notice explicative*. BRGM, France.

[27] Thomas, A. (1970). « Réflexion sur la cartographie géotechnique ». *Premier Congrès International de Géologie de l'Ingénieur*, France.

[28] Peter, A. (1966). « Essai de carte géotechnique ». *Sols-Soils*, 16.

[29] Sanejouand, R. (1972). *La carte géotechnique en France*. Ministère de l'Équipement et du Logement, France.

[30] Wikipédia. *Géostatistique*.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ostatistique>

[31] Wikipédia. *Krigeage*.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Krigeage>

[32] Wikipédia. *Variogramme*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Variogramme>

- [33] Chabane, S., & Selles, A. (2021). *Géostatistique et analyse spatiale des données*.
- [34] Aldungarova, A. et al. (2025). *Application du krigeage ordinaire en géotechnique*.
- [35] BRGM. *Géostatistique et cokrigeage*. <https://www.brgm.fr/fr>
- [36] Chilès, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley.
- [37] Amraoui, B. (2023). *Élaboration de la carte géotechnique d'Aïn Témouchent*. Thèse de doctorat en Géotechnique, Université Belhadj Bouchaïb, Aïn Témouchent, Algérie, 134 p.
- [38] Akakba, A. et al. *Modélisation du plan d'urbanisme de la ville d'El-Eulma (Algérie) : apport de l'intelligence territoriale dans la gouvernance urbaine*. http://www.rjgeo.ro/issues/revue_roumaine%2058_1/ahmed%20et%20al.pdf
- [39] Benbouras, M. (2018). *L'utilisation des SIG sur les données d'infrastructure et de fondations : application dans la zone d'Alger*. Université Abbas Laghrour, Khenchela, Algérie.
- [40] URBAT (2014). *Bureau d'études d'urbanisme*.
- [41] BRGM (2020). *Cartographie de l'aléa mouvement de terrain : méthodologie générale (Nouvelle-Calédonie)*. Rapport BRGM/RP-70345-FR, France.
- [42] Malet, J.-P. CNRS – Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Université de Strasbourg, France.
- [43] Ousmana, H. et al. (2017). *Carte des zones vulnérables à l'érosion hydrique*.
- [44] Région de Bruxelles-Capitale (2019). *Cartes de risque d'inondation*. Document PDF.
- [45] Elaloui, A. et al. (2015). « Mise en place d'un modèle qualitatif pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans la chaîne Atlasique : cas du bassin versant de la Tessaoute amont (Maroc) ». <https://www.researchgate.net/publication/303565881>
- [46] Djaâfar, M., Benmechiche, A., & Bouayed, K. (2021). « Apport des SIG dans la cartographie d'aptitude routière : cas de la RN22 (Tlemcen) ». *Revue Algérienne de Géotechnique*, 12(2), 45-58.
- [47] Malczewski, J. (2015). « GIS and Multicriteria Decision Analysis ». In *International Encyclopedia of Geography*. Wiley.
- [48] IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.