

2022

Les dossiers du géotechnicien
MATERIAUX DE CONSTRUCTION
Sols

(version du 10 décembre 2022)



Janssens Benoît

Table des matières

1. GENERALITES.....	6
1.1 DEFINITION GEOTECHNIQUE D'UN SOL	6
1.2 CAS PARTICULIER DES ARGILES.....	6
1.2.1 Définition et composition	6
1.2.2 Classification	7
1.2.3 Propriétés particulières des argiles	7
1.2.4 Influence de la capacité d'échange cationique.....	8
2. CARACTERISATION D'UN SOL	9
2.1 IDENTIFICATION VISUELLE	9
2.2 ANALYSE PETROGRAPHIQUE	11
2.3 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE	11
2.3.1 Caractéristiques géométriques.....	11
2.3.1.1 Analyse granulométrique	11
2.3.1.2 Teneur en argiles ou qualités des fines	13
2.3.1.3 Limites d'Atterberg (comportement des argiles vis-à-vis de l'eau).....	14
2.3.1.4 Aptitude au gonflement ou activité de l'argile.....	16
2.3.1.5 Forme des grains grossiers	16
2.3.2 Caractéristiques physiques.....	16
2.3.2.1 Densité et masses volumiques	16
2.3.2.2 Surface spécifique des grains (solides).....	17
2.3.2.3 Porosité, compacité et indice des vides (vides).....	18
2.3.2.4 Teneur en eau (phase liquide).....	18
2.3.2.5 Perméabilité ou vitesse de circulation de l'eau	21
2.3.3 Caractéristiques chimiques	22
2.3.3.1 pH ou acidité.....	23
2.3.3.2 Teneur en matières organiques (MO)	23
2.3.3.3 Teneur en soufre, sulfures et sulfates	24
2.3.3.4 Teneur en chlorures, nitrates et phosphates	24
2.3.3.5 Capacité d'absorption	25
2.3.4 Caractéristiques de durabilité.....	25
2.3.4.1 Sollicitations mécaniques	25
2.3.4.2 Sollicitations climatiques.....	26
2.4 ETUDE DE COMPORTEMENT	28
2.4.1 Compactage.....	28
2.4.1.1 Essais et courbes Proctor	29
2.4.1.2 Essais IPI et CBR	30
2.4.2 Compressibilité	33
2.4.2.1 Essai œdométrique	34
2.4.3 Cisaillement	34
2.4.3.1 Cas d'un sol pulvérulent	35
2.4.3.2 Cas d'un sol cohérent	36
2.4.4 Compression.....	37
2.4.4.1 Compression uniaxiale	37
2.4.5 Traction	38

2.5	ANALYSE ENVIRONNEMENTALE	38
3.	CLASSIFICATIONS.....	39
3.1	CLASSIFICATIONS GRANULOMETRIQUES	39
3.1.1	Classification simpliste	39
3.1.2	Diagramme de Taylor (1956) ou classification française (sols fins)	39
3.1.3	Autres classifications granulométriques	40
3.2	CLASSIFICATIONS BASEES UNIQUEMENT SUR LA PLASTICITE	41
3.2.1	Diagramme de Casagrande (1947)	41
3.3	CLASSIFICATIONS GEOTECHNIQUES (granulométrie et plasticité)	42
3.3.1	Classification belge (version wallonne – CCT QUALIROUTES 2020).....	43
3.3.2	Classification française GTR.....	45
3.3.2.1	Sols (classes A, B, C et D)	45
3.3.2.2	Matériaux rocheux (classe R).....	46
3.3.2.3	Sols organiques et sous-produits industriels (classe F).....	47
3.3.2.4	Matériaux élaborés (granulats)	47
3.3.3	Autres classifications géotechniques.....	47
3.3.3.1	Classification européenne (ISO 14688-1 : 2002).....	47
3.3.3.2	Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System), USBR ou "AC Systems" (Airfields Classifications Systems).....	49
3.3.3.3	Classification AASHO (1929).....	50
3.3.3.4	Classification de l'Administration des Routes Américaines	51
3.3.3.5	Classification USDA (sols agricoles)	51
4.	GESTION ENVIRONNEMENTALE DES SOLS WALLONS.....	52
4.1	INTRODUCTION AUX TERMES JURIDIQUES.....	52
4.2	PRESENCE ET DECOUVERTE D'UNE POLLUTION EN WALLONIE.....	53
4.2.1	Textes de référence	53
4.2.2	Comment procéder en cas de pollution ou de doute ?.....	53
4.2.2.1	Procédure classique.....	54
4.2.2.2	Procédure immédiate pour pollution fortuite d'ouvrages linéaires (routes, voies ferrées, etc.).....	55
4.3	GESTION DES TERRES EXCAVEES EN WALLONIE	55
4.3.1	Textes et documents de référence en Wallonie	55
4.3.2	Comment procéder ?.....	55
4.3.3	Logiciel de gestion des terres Utiliterre.....	57
4.4	SITUATION DANS D'AUTRES REGIONS ET PAYS	57
4.4.1	Flandre.....	57
4.4.2	Région Bruxelles - Capitale	57
4.4.3	France	57
4.4.4	Grand-Duché du Luxembourg	58
5.	PRINCIPALES FILIERES DE VALORISATION DES TERRES EXCAVEES	60
5.1	TERRES INERTES ET TERRES DECONTAMINEES	60
5.1.1	Remblais techniques et autres.....	60
5.1.2	Sous-fondation routière	60
5.1.3	Nouveaux matériaux de construction	60
5.1.3.1	Clinker	60
5.1.3.2	Briques en terre crue.....	60

5.1.3.3	Récupération des granulats	60
5.1.4	Sols organiques	60
5.2	TERRES EXCAVEES POLLUEES	60
5.2.1	Opération de décontamination	61
5.2.1.1	Traitement physique	61
5.2.1.2	Traitement biologique	61
5.2.1.3	Traitement chimique	62
5.2.1.4	Traitement physico-chimique	62
5.2.1.5	Traitement thermique	62
5.2.1.6	Mise en décharge des terres excavées polluées	62
5.3	CLASSIFICATION ET CHOIX DES TECHNIQUES	62
5.3.1	Critères de choix	62
5.4	TRAITEMENT DES SOLS HORS SITE	63
5.4.1	Travaux préalables avant traitement hors site	63
5.4.1.1	Excavation	63
5.4.1.2	Transport	63
5.4.1.3	Réception et stockage en centre de traitement	63
5.4.2	Traitement par voie biologique	63
5.4.2.1	Mise en andains	64
5.4.2.2	Biotertre	64
5.4.2.3	Phytoremédiation	64
5.4.3	Traitement par séparation physico-chimique	65
5.4.3.1	Lavage par voie physique	65
5.4.4	Traitement chimique	65
5.4.4.1	Processus de cimentation	65
5.4.4.2	Technique de phosphatation / carbonatation (Sédisol)	65
5.4.5	Traitement par voie thermique ou désorption thermique	66
5.4.6	Inertage	67
5.4.7	Valorisation des terres traitées ou inertes	67
5.5	TRAITEMENT SUR SITE	67
5.6	TRAITEMENT IN SITU	67
5.6.1	Méthodes par extraction ou injection d'une substance	67
5.6.1.1	Bioremédiation (activité biologique)	67
5.6.1.2	Venting (extraction d'air)	67
5.6.1.3	Bioventing (extraction d'air + activité biologique)	68
5.6.1.4	Sparging (injection d'air)	68
5.6.1.5	Biosparging (injection d'air + activité biologique)	68
5.6.1.6	Flushing (injection d'un fluide)	68
5.6.1.7	Oxydation (injection d'oxydants)	69
5.6.1.8	Injection de vapeur	69
5.6.2	Méthodes par injection d'autres facteurs	69
5.6.2.1	Traitement thermique in situ (chaleur)	69
5.6.2.2	Electrical Heating (courant électrique)	69
5.6.3	Techniques de confinement	69
5.6.3.1	Isolation verticale	69
5.6.3.2	Isolation horizontale	69

5.6.3.3	<i>Barrières sélectives/ réactives</i>	70
5.6.3.4	<i>Solidification</i>	70
6.	QUELQUES SOLS WALLONS PARTICULIERS	71
6.1	SOLS ARGILEUX.....	71
6.1.1	Argiles du Condroz et d'Andenne (<i>Miocène – 3,6 Ma</i>)	71
6.1.2	Argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse (<i>Miocène – 3,6 Ma</i>).....	72
6.1.3	Argiles du Groupe de Landen (<i>Paléocène supérieur – 59 Ma</i>)	72
6.1.4	Argile gonflante de la Formation de Vaals ou smectite de Herve (<i>Secondaire - Crétacé : 85 Ma</i>)	72
6.1.5	Argiles d'Aix-la-Chapelle (<i>Secondaire - Crétacé : 85 Ma</i>)	73
6.1.6	Argiles du Groupe du Hainaut (<i>Secondaire - Crétacé : 88 Ma</i>).....	73
6.1.7	Argile d'Etne et d'Arlon (<i>Secondaire - Jurassique : 190 Ma</i>)	73
6.1.8	Argile d'altération des massifs schisto-gréseux (<i>Primaire : > 250 Ma</i>).....	73
6.1.9	Dépôts de kaolinite.....	73
6.2	SOLS LIMONEUX	73
6.2.1	Limon éolien (<i>læss</i>)	73
6.3	SOLS SABLEUX	74
6.3.1	Sable décalcifié	74
6.3.1.1	<i>Sable bruxellien</i>	74
6.3.2	Sable boulant	74
6.3.2.1	<i>Formation d'Aachen</i>	74
6.4	SOLS ROCHEUX	74
6.4.1	Craie et tuffeau.....	74
6.4.1.1	<i>Formation de Gulpen (Crétacé)</i>	75
6.4.2	Marne gypseuse	75
6.4.3	Schiste-carton	75
7.	SOLS PEDOLOGIQUES ET AUTRES DEPOTS RESIDUELS	76
7.1	SOLS OU ELUVIUM.....	76
7.1.1	Définitions.....	76
7.1.2	Composition et description	76
7.1.3	Classifications.....	77
7.1.4	Caractérisation d'un sol	79
7.1.4.1	<i>Texture et structure du sol</i>	79
7.1.4.2	<i>Acidité du sol</i>	79
7.1.4.3	<i>Capacité d'absorption</i>	79
7.2	LATERITE ET SOLS LATERITIQUES	79
7.3	BAUXITE, KAOLIN ET AUTRES SOLS D'ALTERATION ALUMINEUX	80
7.3.1	Kaolin	80
7.3.2	Bauxite.....	81
7.3.3	Terra rosa	81
7.4	ALTERITES VERTES OU DEPOTS DE ROCHES MAGNESIENNES	81
7.5	DEPOTS RESIDUELS METALLIQUES.....	82
7.6	DEPÔTS RESIDUELS QUARTZO-FELDSPATHIQUES.....	82
7.7	AUTRES DEPÔTS RESIDUELS.....	82
7.7.1	Loupes de glissement.....	82
7.7.2	Eboulements.....	82

8. BIBLIOGRAPHIE..... 83

1. GENERALITES

1.1 DEFINITION GEOTECHNIQUE D'UN SOL

Si le terme *sol* peut avoir plusieurs définitions selon le domaine d'application (*séquence d'horizons résultant de l'altération d'une roche mère pour un géologue et pédologue, définition très large pour un juriste, définition restreinte pour l'agronome qui le définit comme le support des plantes*), le géotechnicien définit le *sol* comme *l'ensemble des terrains meubles situés à la surface de la terre sur, dans ou avec lequel le géotechnicien doit réaliser son projet*.

Un *terrain meuble* est un *mélange triphasique (ensemble de phase solides, liquide et gazeuse), d'origine naturelle ou artificielle, relativement tendre (aisément triturable à la main et $R_c < 2-2,5$ MPa)*.

REMARQUE : La valeur R_c de 2 ou 2,5 MPa est purement arbitraire car la limite entre un terrain meuble ($R_c < 2$ MPa) et une roche ($R_c > 2$ MPa) n'est pas toujours évidente à démontrer.

Le sol regroupe les matériaux suivants :

- Les *terrains meubles naturels* : Argile, vase, boue, limon, silt, sable, graviers et cailloux ;
- Les *formations rocheuses "tendres" ou ayant subi une opération préalable de désagrégation* : Marne, craie, schiste altéré, etc. ;
- Les *produits meubles issus de l'activité humaine* souvent présents en remblai : Mélange de terrain meuble et d'éléments grossiers comme de la roche (*à distinguer du bedrock altéré*), de recyclés ou de sous-produits industriels (*scorie, mâchefer, schiste rouge, matériaux de concassage, etc.*).

1.2 CAS PARTICULIER DES ARGILES

1.2.1 Définition et composition

En géotechnique, une *argile* peut se définir comme un *ensemble de particules silicatées de diamètre inférieur à $2 \mu m$ présentant une structure lamellaire et des phénomènes chimiques spécifiques (adsorption, plasticité, substitution interfoliaire, gonflement, etc.)* et donc des comportements très différents par rapport aux autres sols. Un sol argileux est *cohérent*. L'argile provient de l'altération des minéraux silicatés des roches (*feldspaths, micas, amphibolites*) sous l'action du climat et de l'eau.

REMARQUE : La définition minéralogique d'une argile est un phyllosilicate hydraté composé d'aluminosilicate associé à un ou plusieurs cations (*Ca, Na, Mg, K et F*).

La structure générale d'une argile se caractérise par un empilement de feuillets composés de deux types de couches : Une *couche tétraédrique* (SiO_4) et une *couche octaédrique* (Al, Fe ou $MgOH_6$).

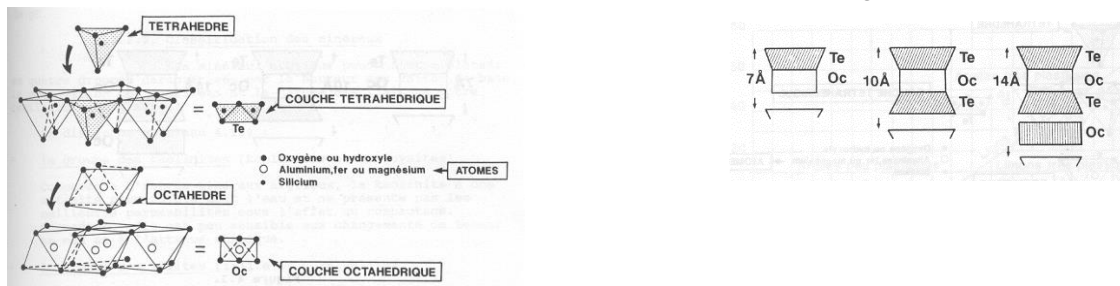


Figure 1.1 : Couches tétraédrique et octaédrique des argiles et principales types de superposition de couches.

Deux modes d'association permettent de différencier les minéraux argileux entre eux sur base de la superposition des deux types de couches formant le *feuillelet* :

- Le *premier mode appelé type 1/1 ou Te-Oc* comporte une couche tétraédrique et une couche octaédrique. La kaolinite est un de ses représentants les plus fréquents ;
- Le *deuxième mode type 2/1 ou Te-Oc-Te* comporte une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques. L'illite, la vermiculite, la chlorite, la smectite et la montmorillonite sont les principaux représentants.

Les feuillets se superposent les uns sur les autres en laissant entre eux, une séparation appelée *espace interfoliaire* qui peut être vide ou occupé par un cation, voire un cation ou encore une molécule d'eau (*si le sol est gorgé d'eau*). C'est cela qui donne le gonflement.

REMARQUE : L'unité structurale d'une argile comprend en réalité un feuillet et un espace interfoliaire adjacent.

1.2.2 Classification

La classification d'une argile comporte ainsi 2 familles principales : 1) Les *argiles simples* sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques et 2) les *argiles interstratifiées* sont composées d'un empilement ordonné ou non de feuillets de nature différente simple (*empilement de feuillets similaires*).

Tableau 1.I - Principaux types et structures d'argiles simples (Monjoie et co : 1992).

Famille	Composition	Epaisseur	Particularités
<i>Kaolinite</i>	Bicouche	7 A°	Peu de substitution ⇒ Argile relativement stable Faible sensibilité à l'eau et aux attaques chimiques Bonne imperméabilité au compactage Climat chaud et humide
<i>Illite</i> (<i>Vermiculite</i>)	Tricouche	10 A°	Substitution moyenne (K+) ⇒ Gonflement moyen Climat aride et tempérée
<i>Chlorite</i>	Tricouche	14 A°	Substitution moyenne (<i>couche octaédrique</i>) ⇒ Gonflement
<i>Smectite</i> <i>Montmorillonite</i>	Tricouche	14 - 17 A°	Substitution H ₂ O + corps étranger ⇒ Gonflement parfois important (<i>jusqu'à 15 fois</i>) Sensibilité aux attaques chimiques Climat semi-aride et altération marine de cendres volcaniques
<i>Argile interstratifié</i>	Variable	14 - 31 A°	Empilement de feuillets différents

REMARQUE : Le type d'argile dépend également de la nature de la roche initiale.

IMPORTANT : L'*halloysite* est une argile particulière présente notamment dans la région de Chaudfontaine (Liège) qui a une aptitude élevée au gonflement sans pour autant avoir les caractéristiques d'une argile gonflante. Sa présence est souvent source de dégâts dans les ouvrages. Elle se détecte, via une analyse par diffraction au rayons X.

1.2.3 Propriétés particulières des argiles

Suite à des substitutions isomorphes de cations dans la structure cristalline (*Al³⁺ remplaçant Si⁴⁺, Mg²⁺ remplaçant Al³⁺, etc.*), les feuillets des argiles sont chargés négativement à leur surface. Cela a tendance à attirer les cations ainsi que les molécules dipolaires d'eau (H₂O).

Les comportements sont différents selon le type de cation ou en présence d'eau :

- Les *cations alcalins* monovalents (K⁺ et Na⁺) sont attirés préférentiellement dans les espaces interfoliaires en raison de leurs faibles charges et masses. Par contre, ils sont très vite chassés de ces endroits par d'autres cations plus chargés et plus lourds ;
- L'eau : La molécule dipolaire d'eau (H₂O) est attirée par l'argile et a tendance à s'y fixer à 2 endroits dans le cas où le sol devient riche en eau :
 - Dans l'espace interfoliaire entre deux feuillets où cette molécule a tendance à remplacer un ion alcalin plus petit et moins chargé. Mais vu leur taille plus importante, cette substitution donne lieu à un **gonflement**. En période de sécheresse, le phénomène inverse se produit et engendre un phénomène de **retrait**. L'amplitude du mouvement est d'autant plus grande que la variation d'épaisseur des feuillets est élevée, soit chez la smectite et la montmorillonite ;
 - A l'extérieur du feuillet d'argile se forme une couche d'eau adsorbée (*eau liée*) appelée **double couche électronique** qui est responsable du comportement plastique de l'argile, joue un rôle de lubrifiant lors du compactage et réduit la perméabilité du sol, l'eau libre devant contourner les grains et cette couche.
- L'ion Ca²⁺ présent notamment dans la chaux se fixe aux mêmes endroits que la molécule d'eau avec toutefois des comportements différents exploités lors du traitement à la chaux :
 - L'ion Ca²⁺ inséré dans l'espace interfoliaire est plus difficile à déloger que la molécule H₂O en raison de sa charge et sa taille élevées. Cela se traduit par une **réduction plus ou moins importante du potentiel expansif de l'argile** ;
 - L'ion Ca²⁺ adsorbé sur le feuillet d'argile prend ainsi la place de la molécule d'eau. Cela engendre les conséquences suivantes : 1) Une diminution du comportement plastique du sol par réduction de la double couche électronique, 2) Un rapprochement des feuillets entre eux sous forme de flocs plus facilement compactables et donc plus résistants à terme par diminution des

charges négatives entre les grains (*les grains d'argile n'ont plus tendance à se répulser*), 3) une réduction de volume du sol suite à la réduction de la couche d'adsorption et 4) une augmentation à court terme de la perméabilité ;

REMARQUE : L'ajout de chaux dans un sol argileux modifie son pH le faisant passer de 7 à plus de 10. Cela génère la dissolution en surface des argiles et favorise la formation de complexes CSH et CAH similaires à ceux du ciment. Les résistances se renforcent mais les perméabilités diminuent à terme.

- Les *agents polluants* comme les métaux lourds ont tendance à se lier aux particules argileuses et à venir s'intercaler dans les espaces interfoliaires. Ainsi, une argile est généralement plus contaminée qu'un sable. Ils ont toutefois peu d'influence sur le comportement géomécanique du sol argileux.

1.2.4 Influence de la capacité d'échange cationique

Tous ces comportements électrochimiques dépendent principalement de la *capacité d'échange cationique*, soit la *quantité de cations présents dans la double couche électronique susceptible d'être remplacée par d'autres cations présents dans la solution percolante*. Elle s'exprime en milliéquivalents par 100 grammes de sol sec.

Cette capacité affecte l'épaisseur de la double couche électronique. Le remplacement d'un cation monovalent par un cation bivalent entraîne une réduction de cette couche, une répulsion plus faible entre les particules, d'où une floculation plus importante et une augmentation de la perméabilité.

Tableau 1.II - Principales caractéristiques des argiles (*Monjoie et co : 1992*).

Groupe	Kaolinite	Illite	Chlorite	Smectite Montmorillonite
<i>Surface spécifique (m²/g)</i>	5 - 20	40 - 100	50 - 200	50 - 800
<i>Capacité d'échange cationique CEC (meq/100g)</i>	3 - 15	10 - 40	10 - 40	80 - 150
<i>Limite de liquidité (W_L - %)</i>	30 - 110	60 - 120	44 - 47	100 - 900
<i>Indice de plasticité (I_p - %)</i>	10 - 40	30 - 70	35 - 100	50 - 700
<i>Activité</i>	0,5	0,5 - 1	1,0 - 1,4	1,7
<i>Perméabilité</i>	< 10 ⁻⁹ m/s			

2. CARACTERISATION D'UN SOL

L'opération de caractérisation doit permettre d'identifier un sol, de prévoir son comportement géomécanique général et de pouvoir comparer différents échantillons entre eux.

2.1 IDENTIFICATION VISUELLE

L'identification visuelle d'un sol se base sur des critères rapides et faciles à utiliser sur terrain afin de lui donner rapidement un nom sommaire généralement accompagné de certaines caractéristiques complémentaires. Cette opération permet également de regrouper les différents échantillons récoltés en familles distinctives et d'en déduire ses principales caractéristiques comportementales (*ex : la tourbe est synonyme de tassement*), ce qui constitue une étape préalable nécessaire à la poursuite de la caractérisation.

Les principaux critères sont les suivants :

- La **granulométrie moyenne** accompagnée d'observations (*toucher et éclat de la surface permettent de distinguer l'argile du limon*) fournit le nom général du sol. D'autres observations comme la succion sur la langue (*une succion élevée pour une argile*) et le temps de séchage (*un temps court correspond à un sable*) peuvent être également réalisées ;

Tableau 2.I - Identification *in situ* des terrains meubles sur base de la granulométrie.

Nomenclature	Critères d'identification		
	Granulométrie	Toucher	Eclat surface polie
Argile	Grains non visibles à la loupe	Doux	Surface luisante
Silt, limon ou loess	Grains visibles à la loupe, et surface mate	Doux à rêche	Surface mate
Sable	Grains bien visibles à l'œil nu et décomposition aisée	Rêche	---
Graviers	Taille d'un petit pois ($2 < \varnothing < 20 \text{ mm}$)	---	---
Cailloux	Taille d'un raisin à un melon ($20 < \varnothing < 200 \text{ mm}$)	---	---
Bloc rocheux	Taille supérieure à un ballon de football ($\varnothing > 200 \text{ mm}$)	---	---

Tableau 2.II - Moyens pour distinguer sur chantier, une argile et un limon.

Lithologie	Eclat sur tranche au couteau	Lavage des mains	Sensation langue
Argile	Surface brillante	Difficile	Ne crisse pas
Limon ou silt	Surface terne	Non difficile	Crisse

Outre les sols les plus fréquents cités ci-dessus, il est possible de rencontrer les sols suivants :

- La **vase** est une **argile gorgée d'eau** dont la formation est liée à un milieu calme (*lac, port, rivière à faible débit, etc.*) ;
- La **tourbe** est un **matériaux fibreux de couleur sombre riche en matières organique et en eau**. Elle résulte de la décomposition de la matière organique et peut présenter des tassements importants ;
- La **marne** est un **matériau intermédiaire entre l'argile et le calcaire ou la craie**. Elle est riche en carbonates. Elle être sensible au contact de l'eau et présenter des phénomènes de dissolution ;
- La **texture** et la **structure du sol** commandent notamment la porosité totale du sol et la circulation de l'eau et des gaz. Selon les cas, le sol sera bien aéré ou au contraire asphyxiant.
 - La **structure du sol ou mode d'assemblage des particules** intervient selon 2 formes différentes :
 - La **structure particulaire** : Les particules sont indépendantes les unes des autres ;
 - La **structure grumeleuse** : Les particules s'agglutinent en agrégats et sont à l'état floculé.
 - La **texture ou le calibre des particules minérales** détermine en grande partie la capacité d'un sol à stocker l'eau, élément vital pour les plantes et sa productivité.
 - Un **sol sableux** ne peut stocker suffisamment d'eau pour une alimentation correcte des plantes. De plus, une grande partie des sels minéraux migre vers le sous-sol. Ce sol devient très vite stérile ;
 - Un **sol limoneux ou argilo-**, moins perméable, constitue un excellent réservoir d'eau et de substances minérales directement absorbables par les végétaux ;
 - Un **sol argileux**, imperméable, a tendance à se gorger d'eau. C'est un sol lourd, collant, difficile à labourer et souvent mal aéré ; ce qui nuit à la croissance normale des plantes.

- La **plasticité d'un sol fin** s'obtient par l'observation de l'éclat de la surface polie ou en réalisant le test du rouleau ($\varnothing < 5mm$) qui consiste à observer le comportement des fragments issus de la décomposition d'un rouleau. Si les particules peuvent être rassemblées en mottes pétrissables sous forte pression des doigts, il s'agit d'un sol à forte plasticité ;
- La **couleur** permet de déterminer la présence de certains éléments tels que le fer (*rouge*), la glauconie (*vert*) ou la matière organique (*noir*). En présence d'un sol homogène, la couleur peut être définie selon plusieurs chartes colorimétriques dont la plus fréquente est la "Soil Color Chart" de Munsell ;

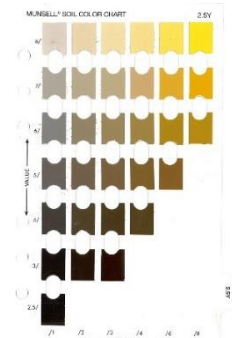


Figure 2.1 : Exemple de plaque de couleurs issue de la Soil Color Chart de Munsell.

- Une **odeur éventuelle** provenant de certains matériaux comme un sol riche en matières organiques (*odeur âcre*), pollué aux hydrocarbures ou traité au ciment et l'argile mouillée (*odeur de terre*) ;
- La **réaction effervescente à l'acide chlorhydrique** ($HCl_{20\%} - CaCO_3 + 2 HCl \leftrightarrow CaCl_2 + H_2CO_3 \uparrow$) permet de vérifier la présence de carbonates et donc la basicité du sol. L'intensité du bouillonnement fournit une approximation de la teneur en carbonates ;
- L'**estimation de la teneur en eau** passe principalement par l'expérience de terrain et l'essai de dilatance qui consiste à secouer une boulette de sol mouillé dans la main et à l'écraser par la suite ;
- L'**examen d'éventuelles hétérogénéités** (*éléments grossiers indurés, galets arrondis, silex, fossiles, minéraux particuliers, etc.*) ou de **discontinuités** consiste à préciser leur nature, leur taille et leur proportion afin de déceler s'il s'agit d'un sol en place ou d'un remblai ;
- L'**état d'altération** modifie les propriétés géomécaniques. Certaines roches (*schistes*) peuvent évoluer rapidement à l'air et perdre leur consistance en un délai très court. Selon les conditions climatiques, l'altération peut atteindre des profondeurs plus ou moins importantes ;

Tableau 2.III - Classification des états d'altération d'une roche.

Etat d'altération	Description
Saine	Pas de trace visible d'altération, de décoloration ou de circulation d'eau orange sur les faces
Peu altérée	Présence légère d'altération superficielle sur les faces des discontinuités
Moyennement altérée	Présence d'altération au sein de la matrice mais la roche n'est pas friable. Traces de circulation d'eau orange assez fréquente
Très altérée	Présence d'altération au sein de la masse rocheuse. Une partie de la roche est friable à la main. La masse est complètement décolorée. Présence d'un son particulier lors de coups de marteau
Complètement altérée	Roche complètement friable en sol avec perte de toute structure initiale

- L'**estimation du comportement du sol** peut être déterminée à partir de l'observation des parois du sondage ou de l'essai de résistance manuelle du matériau sec. Dans ce cas, un morceau de sol sec est écrasé entre les doigts et son comportement entre les doigts est observé.

Tableau 2.IV - Critères visuels de comportement du matériau sec d'un sol.

Comportement	Lithologie
Le sol se rompt sous faible pression	Sable silteux, silt organique
Le sol se rompt difficilement	Argile silteuse ou sableuse Argile à faible ou moyenne plasticité
Le sol ne se rompt pas	Argile inorganique très plastique Sol granuleux cimenté

D'autres caractéristiques particulières peuvent être également notées comme la radioactivité, etc.

Toutes ces données peuvent être reprises dans une fiche descriptive, comme celle reprise ci-dessous.

Origine de l'échantillon :
Caractéristiques	Observations et commentaires
Granulométrie Estimation de la granulométrie moyenne Toucher, succion, rapidité de séchage	Argile
Plasticité (sol cohérent) Eclat de la surface polie, test du rouleau	Peu plastique

Couleur	Verte
Odeur éventuelle	Pas d'odeur
Traitement à l'acide chlorhydrique (20%)	Non
Diversité ou homogénéité des composants Types d'éléments grossiers Caractérisation d'éventuels éléments grossiers	Quelques débris de silex 3 à 5 cm
Teneur en eau	Humide
Estimation du comportement du matériau Résistance du matériau sec, tenue du trou	Relativement compacte. Bonne tenue du trou
Autres caractéristiques	----
NOM	Argile peu plastique verte (non carbonatée) contenant quelques débris centimétriques (3 – 5 cm) de silex, humide et relativement compacte

Figure 2.2 : Exemple de fiche descriptive d'un sol.

2.2 ANALYSE PETROGRAPHIQUE

La pétrographie regroupe l'ensemble des dispositifs généralement sophistiqués (*microscopes divers, spectromètre de masse, diffraction par rayons X, etc.*) permettant de préciser les paramètres suivants et d'appréhender certains comportements du sol :

- La **nature minéralogique et chimique des grains** joue un rôle prépondérant dans le comportement d'un sol. Ainsi, un sol carbonaté ou riche en matières organiques peut se dissoudre et affaiblir les propriétés géomécaniques. L'analyse minéralogique fournit une indication sommaire sur le comportement du matériau aux cycles gel – dégel. Le spectromètre de masse fournit des informations sur la présence éventuelle d'argiles gonflantes (*smectite ou montmorillonite*) ;
- La **caractérisation morphologique des grains fins** : La forme (*arrondie, sphérique, plaquettes, aiguille, etc.*), l'angularité et la texture de surface des grains argileux et limoneux peuvent avoir une influence lors des opérations de compactage, tout comme les formes particulières (*coquilles, etc.*) ;
- La **texture (échelle microscopique)** et la **structure des sols (joint de stratification, fissure, litage, etc.)** provoquent très souvent une anisotropie des propriétés mécaniques et physiques. Ainsi, une structure litée peut présenter des variations de perméabilité de 1 à 100, voire 1 000 selon la direction considérée. Certaines argiles montrent des structures de glissement.

REMARQUE : Cette science est laissée de côté de nos jours en raison de son coût onéreux et n'est pratiquée que dans certains cas particuliers. Pourtant, elle fournit des renseignements bien utiles.

2.3 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE

La caractérisation géotechnique d'un sol est l'étape la plus longue car elle comporte de nombreux essais normalisés réalisés généralement à partir d'échantillons remaniés en vue d'obtenir une carte d'identité détaillée du sol.

REMARQUE : Les normes permettent de comparer les résultats entre eux et de rentrer dans les différentes classifications de sol.

Les principales normes européennes concernant les essais en laboratoire des sols font partie de la série EN 17892 (*Reconnaissances et essais géotechniques – essais de laboratoire sur les sols*). D'autres normes interviennent pour des essais bien spécifiques.

REMARQUE : Le présent chapitre reprend les différents essais répartis en 4 familles (*similaires aux granulats*), à savoir géométrique, physique, chimique et durabilité. Les essais sont brièvement décrits dans ce chapitre. Pour de plus amples informations sur ces essais, le lecteur pourra consulter le dossier spécifique aux essais en laboratoire.

2.3.1 Caractéristiques géométriques

2.3.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique d'un sol préparé (*homogénéisé, émiété et éventuellement broyé à sec*) comporte une ou deux opérations :

- Le **tamissage** concerne les particules de diamètre supérieur à 63 µm pour des raisons pratiques. L'essai consiste à faire passer l'échantillon à travers une colonne de tamis dont les mailles sont de plus en plus petites vers le bas et à mesurer par la suite, la quantité de refus à chaque bac. Un mouvement

vibratoire (*mécanique suivi éventuellement d'un mouvement manuel*) et un éventuel courant d'eau sont fournis en simultanée afin de pouvoir séparer une majorité des particules agglutinées ;

- La **sédimentométrie** concerne les particules fines ($\varnothing < 63$) pour lesquels la technique du tamisage ne convient plus (*fortes liaisons moléculaires difficiles à casser*). L'essai se base sur la loi de **Stokes** où la vitesse de sédimentation d'un corps sphérique est proportionnelle au carré de son diamètre. Ainsi, plus le grain est fin, plus sa vitesse de chute est lente. Il consiste à laisser une suspension de sol dispersé se déposer au fond d'une éprouvette remplie d'eau accompagnée d'un défloculant (*hexametaphosphate de sodium*) et à mesurer au moyen d'un densitomètre, la densité de différentes tranches d'eau à différents moments. Le résultat est une répartition des grains selon leur "**diamètre équivalent**". Cette méthode relativement cher ne se pratique que pour certaines applications. De plus, il faut faire attention au pH et aux éventuelles réactions chimiques avec le défloculant.

REMARQUE : L'analyse granulométrique peut être établie au moyen d'analyse optique (*ombre des particules chutant*) ou du laser.

Les pourcentages cumulés de refus ou de passant sont reportés sur un graphe en fonction de la dimension des grains et donne lieu à une **courbe granulométrique**.

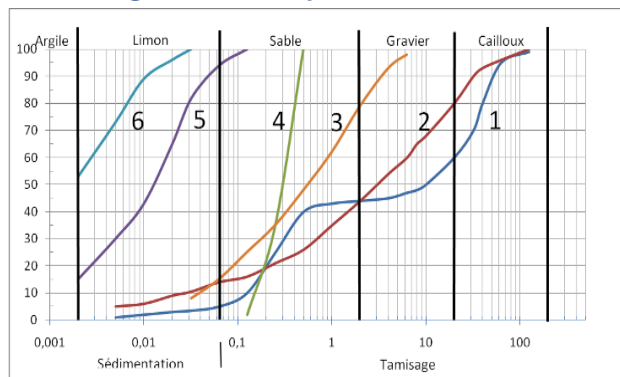


Figure 2.3 : Exemples de courbes granulométriques obtenues à partir d'analyses de différents sols : Courbe 1 : Matériau à granulométrie étalée et discontinue (alluvions de sable et cailloux), Courbe 2 : Granulat à granulométrie étalée et continue (arène granitique), Courbe 3 : Sable continu, Courbe 4 : Sable homogène, Courbe 5 : Limon argileux et Courbe 6 : Argile limoneuse.

REMARQUE : Deux analyses granulométriques réalisées sur un même échantillon ne donnent pas nécessairement deux courbes granulométriques identiques. Cette différence est d'autant plus marquée en utilisant des normes ou des tamis différents. Le résultat est donc une **granulométrie effective**.

L'analyse de la courbe granulométrique complète fournit les informations suivantes :

- Le **nom du sol** est déterminé à partir de la position de la courbe dans le graphe granulométrique ;
- La **répartition granulométrique** fournit certaines informations sur le comportement au compactage et la perméabilité du sol ainsi que le type d'eau prédominante (*gravifique ou de rétention*). Le **coefficient d'uniformité (Cu)** ou **coefficient d'HAZEN** équivaut généralement à : $Cu = d_{60 \text{ ou } 80} / d_{10}$ (d_{10} et $d_{60 \text{ ou } 80}$: \varnothing de la maille pour lequel 10 et 60 ou 80% des constituants passent à travers). Ce coefficient permet de distinguer deux types de sols aux propriétés distinctes :
 - Un sol **homométrique, bien classé ou mal gradué** se caractérise par une répartition granulométrique restreinte, une courbe granulométrique assez verticale (*courbe 4 de la figure*) et une faible valeur de coefficient d'uniformité ($Cu < 4$ à 6 selon la lithologie). Ce sol présente des problèmes de compactage et de densité mais se caractérise par une forte perméabilité suite au manque de remplissage des interstices par des particules plus fines entre éléments majoritaires. L'eau gravifique est prédominante ;
 - Un sol **hétérométrique, mal classé ou bien gradué** se caractérise par une répartition granulométrique large, une courbe granulométrique inclinée (*courbe 3 de la figure*) et une valeur relativement élevée de coefficient d'uniformité ($Cu \geq 4$ à 6 selon la lithologie). Ce sol présente de bonnes caractéristiques de compactage et de densité mais une plus faible perméabilité suite au remplissage des interstices par des particules fines entre éléments majoritaires. L'eau de rétention est prédominante.

REMARQUE : Bien que peu utilisé en géotechnique, il existe également le *coefficient de courbure* $C_c = d_{30}^2 / (d_{10} \cdot d_{60})$ (d_{10} , d_{30} et d_{60} : \varnothing de la maille pour lequel 10, 30 et 60% des constituants passent à travers).

- Le **diamètre maximal des grains** (D_{max}) fournit une indication sur la taille des éléments grossiers. Ce paramètre est notamment important pour déterminer les conditions pratiques d'un traitement de sol (*nécessité de réaliser un broyage préalable pour $D_{max} \geq 50$ mm*) ;
- La **teneur en fines** (f) se définit généralement comme le *pourcentage d'éléments passant à travers le tamis de 63 μ m*, soit les particules susceptibles de présenter des réactions chimiques. Ce paramètre permet de prévoir certains comportements du sol lors du compactage ou de son traitement éventuel (*nature du liant*) ;

REMARQUE : Il faut prêter plus d'attention à la partie basse de la courbe qu'à la partie haute car cette partie est plus influente sur le comportement du matériau, notamment au niveau du compactage.

- Le **fuseau granulométrique** peut être établi en présence de plusieurs échantillons par superposition des courbes pour déterminer les variations granulométriques d'une même famille de sol.

Dans un certain nombre de cas, une **analyse simplifiée**, soit une analyse réalisée sur 3 tamis (63 ou 80 μ m, 2 mm et 50 mm) permet déjà d'avoir une bonne information sur le matériau et de rentrer notamment dans la classification française GTR :

- Le **tamis de 63 ou 80 μ m** détermine s'il s'agit plus d'un sol fin (*éventuellement traitable à la chaux*) ou d'un sol pulvérulent de type sable ou gravier ;
- Le **tamis de 2 mm** permet de voir la répartition entre le sable fin et le sable grossier ;
- Le **tamis de 50 mm** montre s'il existe des éléments dont le diamètre est supérieur à la taille de ce tamis et qui nécessiteront un fraisage préalable en cas de traitement.

2.3.1.2 Teneur en argiles ou qualités des fines

Un sol contient souvent une certaine quantité de fines ($\varnothing < 63 \mu$ m) dont il importe de déterminer leur nature inerte ou argileuse (*comportements chimiques*) afin d'estimer le comportement du sol. Deux méthodes principales existent :

- L'**essai au bleu de méthylène** (MB-EN 933-9) convient pour un sol moins argileux. Cet essai basé sur le phénomène d'adsorption chimique, détermine la teneur en argiles en mesurant la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer l'argile contenue dans l'échantillon. Le point de saturation est obtenu lorsque l'auréole bleu clair entourant la tache bleu foncé demeure après 5 minutes. Toute l'argile est alors saturée en bleu. La quantité de bleu de méthylène nécessaire pour arriver à ce point permet de déterminer la teneur en bleu de méthylène pour un kilo de matière sèche (*gr MB/kg Masse sèche*).

REMARQUE : Il existe une différence d'unités entre la norme actuelle (**MB** - gr/kg de matériau 0/2) et l'ancienne norme française (**VBS** - kg/100 gr de matériau 0/5). Autre différence : L'essai VBS est réalisé sur la fraction 0/50.

Cet essai s'effectue sur la fraction 0/2 mm bien qu'une fraction plus fine (0/0,125 mm - **MB_F**) puisse être testée. Ce dernier essai réalisé principalement sur des fillers montrent une valeur plus élevée.

Plus la valeur est élevée, plus le sol est argileux.

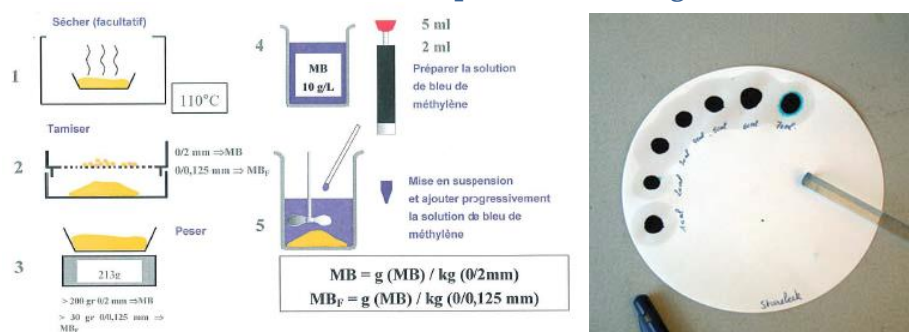


Figure 2.4 : Principe de l'essai au bleu de méthylène à la tache.

Tableau 2.V – Description d'un sol sur base de la valeur de MB.

MB (gr bleu /kg de masse 0/5)	Sol
< 2	Sol insensible à l'eau (<i>sable, pierre</i>)

2 - 10	Sol peu limoneux
10 - 25	Sol limoneux
25 - 60	Sol limono-argileux
60 - 80	Sol argileux
> 80	Sol très argileux

En réalité, l'essai est influencé par certains paramètres du sol :

- La matière organique et les hydroxydes de fer absorbent également une partie du bleu de méthylène et faussent le résultat ;

La surface spécifique des argiles influence fortement la valeur MB. Ainsi, la montmorillonite qui dispose d'une importante surface spécifique réagit plus que la kaolinite ou que les fines inertes (1-3 m²/g). L'essai donne néanmoins une bonne image du caractère argileux de l'échantillon.

- L'indice de plasticité (Ip) convient pour un sol relativement argileux (Ip > 12). La méthodologie est reprise dans le paragraphe suivant.

REMARQUE : Un troisième essai peut être réalisé uniquement pour un sable. L'Equivalent en Sable (ES ou SE) se base sur la sédimentation séparée entre le sable et les particules argileuses. Cet essai est limité à une teneur en fines inférieure à 10 %.

2.3.1.3 Limites d'Atterberg (comportement des argiles vis-à-vis de l'eau)

Pour un sol argileux, l'analyse granulométrique ne suffit pas en raison des phénomènes d'attraction moléculaire. De plus, le comportement d'un tel matériau varie selon la teneur en eau et la nature des argiles. Plusieurs états existent et sont délimités par les limites d'Atterberg.

Par augmentation de la teneur en eau, ces états et limites sont :

- L'état solide ou solide sans retrait : La faible quantité d'eau s'insère dans les interstices en remplaçant progressivement l'air. Les argiles commencent à s'entourer d'une couche d'adsorption. Un maximum de grains se touchent entre eux. Il n'y a pas de variation de volume. La cohésion est maximum ⇒ La résistance est importante et le comportement du matériau est cassant ;
- La limite de retrait (Ws) : Teneur en eau à partir de laquelle son volume ne diminue plus lorsqu'un sol est séché ;
- L'état semi-solide ou solide avec retrait : L'eau occupe la quasi-totalité des interstices, les couches d'adsorption sont importantes. L'eau commence à s'insérer dans la structure des argiles, augmentant ainsi le volume du sol (figures de dessiccation). Les grains commencent à se séparer ⇒ La cohésion et les résistances diminuent ;
- La limite de plasticité (Wp) : Teneur en eau sous laquelle le sol ne peut plus être pétri sans se fissurer ;
- L'état plastique : L'eau libre commence à séparer les grains qui ne se touchent plus que par leurs couches d'adsorption. La cohésion et la résistance diminuent ⇒ Le matériau devient très malléable sans variation de volume. Il a tendance à se déformer plutôt qu'à casser. Le sol est saturé et peut être pétri. Un phénomène de panse de vache apparaît à fur et à mesure que se rapproche la limite de liquidité ;
- La limite de liquidité (Wl) : Teneur en eau minimum pour laquelle le sol s'écoule sous l'action d'un faible remaniement ;
- L'état liquide : L'excès d'eau sépare entre elles, les particules solides et les met en suspension bien qu'elles disposent d'une épaisse couche d'adsorption. Il n'y a plus de cohésion ⇒ Le matériau présente peu ou pas de résistance (comportement de vase ou de boue).

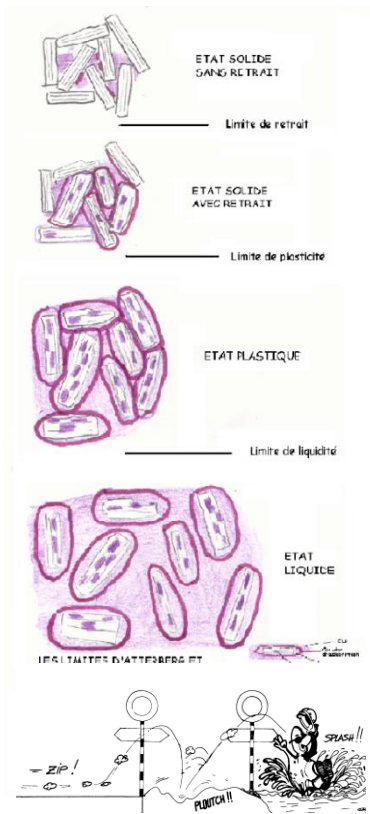


Tableau 2.VI - Propriétés des argiles en fonction de l'état considéré.

Etat	Contenu interstitiel	Contact intergranulaire	Contact chimique	Résistance
Solide sans retrait	Air + eau	80 - 100 %	0 - 20 %	++++

Solide avec retrait	Eau + air	10 - 70 %	20 - 90 %	+++
Plastique	Eau	0 - 10 %	90 - 100 %	++
Liquide	Eau	0	0 %	--

REMARQUE : La nature des argiles joue un rôle important dans le comportement du sol. En effet, dans la kaolinite, l'eau ne peut se loger qu'entre les grains d'argile. Dans l'illite et surtout la montmorillonite, l'eau peut s'insérer également entre les feuillets. Ces derniers s'écartent et augmentent plus encore le volume.

Les 3 limites sont mesurées par différents essais souvent simples et réalisés sur la fraction 0 / 420 µm.

- La **limite de retrait (Ws)** est calculée par un ensemble de mesures de volume à fur et à mesure que la teneur en eau diminue ou par la formule suivante : $W_s = 5,4 - 0,27 W_L + W_p$. Cependant, la détermination de cette limite n'est intéressante que dans certains cas (*sols gonflants et rétractables*). De plus, la mesure est relativement imprécise ;
- La **limite de plasticité (Wp)** correspond en pratique à la teneur en eau à partir duquel il n'est plus possible de faire rouler sur un matériau non absorbant et ni réactif (*verre ou marbre*), un boudin de 3 à 4 mm de diamètre et de 10 à 15 cm de long sans qu'il se tronçonne. Le caractère artisanal de cet essai peut prêter à sourire mais il correspond à un changement de comportement mécanique parfaitement net. Il dépend toutefois de l'opérateur ;



Figure 2.5 – Limite de plasticité.

- La **limite de liquidité (WL)** est la teneur en eau pour laquelle une rainure se referme après 25 coups sur la coupelle de Casagrande (2 chutes de 10 mm/sec). Cette limite est obtenue par extrapolation de 4 à 5 essais à des teneurs distinctes, sur un diagramme ln N - W. Cette limite peut se déterminer à partir d'un seul essai si le nombre de coups mesuré est compris entre 15 et 35 et ce, à partir de la formule suivante : $W_L = w (N/25)^{0,121}$ Avec w : teneur en eau de la pâte de sol et N : nombre de chocs correspondant à w. Cet essai tend à être remplacé actuellement par un essai au poinçonnement par cône.

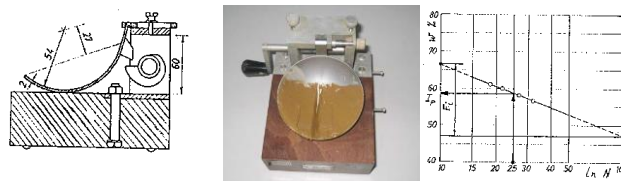
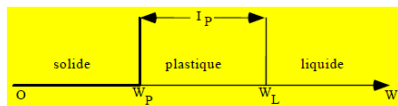


Figure 2.6 – Principe de l'appareil de Casagrande.

La comparaison de la teneur en eau naturelle avec les limites d'Atterberg fournit une idée de l'état actuel du sol, ainsi que des indices liés au comportement du sol :

- L'**indice de plasticité (Ip = WL - Wp)** représente le domaine de teneur en eau au sein duquel le sol a un comportement plastique (*déformation tout en conservant une certaine résistance au cisaillement*). **Plus Ip est grand, plus l'attraction entre les particules de sol est grande et plus le sol est argileux.**

Tableau 2.VII - Classification de l'argilosité d'un sol sur base de la valeur de l'indice de plasticité.



Indice de plasticité (Ip)	Type de sol
Non mesurable	Sol non argileux
< 12	Limon à faible teneur en argile
12 - 25	Limon moyennement argileux Argile limoneuse peu plastique
25 - 40	Argile peu limoneuse Tourbe
> 40	Argile très plastique

REMARQUES : La valeur I_p doit être interprétée avec une certaine flexibilité, vu l'influence de l'opérateur sur les essais de limites de liquidité et de plasticité. Des essais entre laboratoires ont montré des variations de 25 à 30% sur l'indice de plasticité.

Un sol d'indice de plasticité faible est plus sensible à l'eau qu'un sol à plasticité élevée.

- L'**indice de consistance** ($I_c = (W_L - W)/I_p$) fournit une information sur la consistance du sol argileux. Il n'a pas de sens pour un sol comprenant moins de 80% de particules de $\varnothing < 400 \mu\text{m}$;

Tableau 2.VIII - Classification de la consistance d'un sol sur base de la valeur de l'indice de consistance.

Indice de consistance (I_c)	Type de sol
< 0	Sol à l'état liquide
0 - 0,5	Sol à l'état plastique présentant des risques de problème de traficabilité
0,5 - 1,3	Sol consistant ou à l'état solide (<i>situation idéale</i>)
> 1,3	Sol de consistance élevée pouvant présenter des problèmes d'extraction

- L'**indice de liquidité** ($I_L = (W - W_p)/I_p$) est rarement utilisé en géotechnique.

2.3.1.4 Aptitude au gonflement ou activité de l'argile

L'activité d'une argile traduit l'aptitude de celles-ci à gonfler. Le **coefficient d'activité** (A) est déterminé à partir de l'indice de plasticité et de la teneur en argile selon plusieurs formules :

- $A = I_p / \% < 2\mu\text{m}$
- $A = I_p / (\% < 2\mu\text{m} - 5)$ Si la teneur en argile est inférieure à 40%.
- $A = I_p / (\% < 2\mu\text{m} / \% < 420 \mu\text{m})$ Pour un sol grossier, la teneur en fines se compte par rapport au passant à 420 μm .

Tableau 2.IX - Classement des argiles selon leur activité.

A	Type d'argile
< 0,75	<i>Argile inactive</i> (kaolinite)
0,75 - 1,25	<i>Argile normale</i> (illite)
> 1,25	<i>Argile active</i> (montmorillonite, smectite, bentonite).

REMARQUE : L'argile active possède certaines propriétés thixotropiques (*passage subit de l'état solide à l'état liquide*) et une tendance à former un cake imperméable. C'est pourquoi elle est particulièrement appréciée en forage et en génie civil.

2.3.1.5 Forme des grains grossiers

Dans le cas d'un sol pulvérulent (*sable et graviers*), la forme des grains grossiers peut avoir une influence non négligeable. Plusieurs essais spécifiques pour une application comme granulats existent pour déterminer notamment leur comportement au compactage.

- Le **coefficient d'aplatissement** (F_{Ix}) consiste à tamiser l'échantillon à travers des tamis à fente ou à grille. Le résultat fournit une idée sur la quantité d'éléments de forme aplatie qui ont tendance à plus vite se fragmenter et à s'orienter selon une orientation préférentielle ;
- Le **coefficient d'écoulement** (E_c) se base sur le temps nécessaire pour faire écouler une certaine quantité de sable à travers un entonnoir. Plus la vitesse est rapide, plus les grains sont arrondis et ont une tendance à vite se compacter mais également se décompacter ;
- La **teneur en coquilles** (SC_x) consiste à séparer les coquilles ou fragments de coquille dont les formes particulières peuvent influencer le compactage ;
- Le **pourcentage de surfaces cassées** ($C_{x/y}$) concerne la quantité d'éléments semi concassés (x) et d'éléments totalement arrondis (y) ;

2.3.2 Caractéristiques physiques

Un sol est un milieu triphasique où les trois phases (*solides, liquide et gazeuse*) jouent un rôle important dans le comportement du matériau. Entre les particules solides se trouvent des vides interstitiels où cohabitent les phases liquides et les phases gazeuses en proportion variable.

2.3.2.1 Densité et masses volumiques

Il existe plusieurs types de masse volumique dont les plus importantes sont :

- La **densité** d'un matériau est le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau (qui vaut 1). Cela permet de supprimer les unités ;

- La **masse volumique absolue** (ρ_a) est la masse par unité de volume du matériau sans prendre en compte le moindre vide (vides internes et entre les grains). Toutefois, cette valeur élevée n'est jamais présente en réalité. Elle est de l'ordre de 2 700 kg/m³ pour l'ensemble des minéraux inertes d'un sol (calcite, quartz, feldspath et argiles) ;
- La **masse volumique réelle** (ρ_{rd}) est la masse par unité de volume du matériau sec en tenant compte uniquement des pores et fissures présents dans les éléments mais pas des vides interstitielles. Cette valeur plus réaliste est moins élevée que la masse volumique absolue. Elle sert pour calculer le dosage de liant en cas de traitement de sol ;
- La **masse volumique apparente** (ρ_{app}) ou *en vrac* est la masse par unité de volume du matériau en tenant compte de tous les vides (vides interstitielles, pores et fissures) sans réel compactage. Cette valeur obtenue après remplissage d'un certain volume permet de déterminer le nombre de bennes nécessaires au transport et donc le coût de transport et le **foisonnement** de certains sables (variation du paramètre en fonction de la teneur en eau) ;

Tableau 2.X - Principales valeurs de masse volumique apparente de terrains meubles.

Matériaux	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Matériaux	Masse volumique apparente (kg/m ³)
Terre végétale	1 250 - 1 500 (1 400)	Sable humide	1 450 - 1 800 (foisonnement)
Argile	1 300 - 1 700 (1 500)	Sable saturé	2 000
Limon	1 450 - 1 650 (1 550)	Gravier roulé	1 300 - 1 600 (1 500)
Sable sec	1 400 - 1 600 (1 550)	Gravier concassé	1 380 - 1 800 (1 650)

REMARQUE : La valeur entre parenthèse correspond à une valeur moyenne.

- La **masse volumique sèche** est la masse par unité de volume du matériau sec en tenant compte de tous les vides (vides interstitielles, pores et fissures) après compactage. Sa valeur est plus élevée que celle de la masse volumique apparente et varie selon la teneur eau du sol au moment du compactage. Elle varie de 1 700 à 2 200 kg/m³ pour les sols les plus courants. Sa détermination est importante pour le compactage puisqu'elle détermine la valeur optimale de teneur en eau à atteindre ;
- La **masse volumique humide** est la masse par unité de volume du matériau humide en tenant compte de tous les vides (vides interstitielles, pores et fissures) après compactage et de la teneur en eau. Cette valeur est donc plus élevée que la masse volumique sèche et prend en compte la teneur en eau. Elle est également importante lors du compactage puisqu'elle détermine la valeur optimale à atteindre ;
- La **masse volumique immergée** ou **masse volumique réelle imbibée** est la masse par unité de volume du matériau immergé dans l'eau durant 24 h en tenant compte uniquement des pores ouverts et fissures présents dans les éléments mais pas des vides interstitielles. Elle fournit une indication sur la porosité ouverte. Elle varie entre 700 et 1 200 kg/m³.

Toutes les méthodes de mesure sont basées sur le principe d'Archimède et utilisent un moule, un pycnomètre, une éprouvette ou du papier au treillis (masses volumiques réelle et absolue) selon la dimension des grains testés.

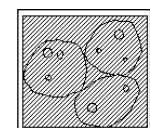
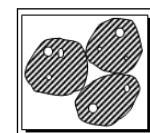
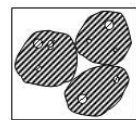


Figure 2.7 - Exemples de moules et de pycnomètres.

Le **foisonnement d'un sable** se définit comme une *variation de sa masse volumique apparente selon la teneur en eau*. Cela se traduit par une augmentation du volume (diminution de la masse volumique apparente).

2.3.2.2 Surface spécifique des grains (solides)

La **surface spécifique** d'un sol est la somme des surfaces de chaque grain contenu dans un 1 gr de sol. Elle s'exprime en m²/gr. Celle-ci augmente avec la finesse d'un sol. Ce paramètre est important à déterminer lors du traitement des sols et en cas de pollution du sol.

Tableau 2.XI - Valeurs de surface spécifique en fonction de la granulométrie.

Lithologie	Surface spécifique (m ² /gr)
Argile	5 - 800
Limon	0,001 - 3
Sable	< 1

2.3.2.3 Porosité, compacité et indice des vides (*vides*)

Les vides se présentent en réalité sous différentes formes : Les *vides interstitielles* présents entre les grains, les *pores* (*ouverts et fermés*) contenus dans les éléments selon un véritable réseau ou pas et les *fissures*. Ils influencent un certain nombre de propriétés et comportements mécaniques du sol comme le compactage, la portance, la résistance aux cycles gel-dégel, etc.

Plusieurs paramètres donnent une information sur les vides :

- La **porosité d'un granulat (n)** équivaut au *rapport du volume des vides (V_{vide}) pouvant être remplis d'eau au volume total du matériau (V_{total})*.
$$n = (V_{vide} / V_{total})$$

De nombreux facteurs (*taille, forme, altération, degré de classement, agencement des grains, présence d'une matrice, taux de compacité, etc.*) interviennent dans la valeur de la porosité. Il est donc quasi impossible de prévoir la porosité d'un matériau sur base d'une simple analyse granulométrique.

REMARQUES : En présence de sphères de même diamètre, la porosité varie de 26 à 48% selon l'agencement. Si les diamètres différent, la porosité diminue ; les petites sphères se calant entre les grandes sphères qui forment la structure. Il en est de même pour les grains anguleux.

En hydrogéologie, la notion de *porosité efficace* (*rapport du volume d'eau gravifique dans une roche saturée sur le volume total*) est utilisée.

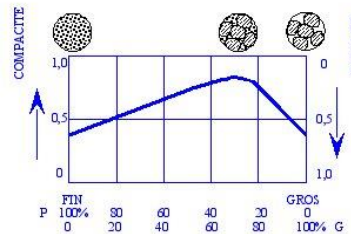


Figure 2.8 : Relation entre la porosité, la compacité et la répartition granulométrique (Holtz : 1954).

- La **compacité (c)** correspond au *rapport du volume des solides (v_{solide}) sur le volume total*. C'est l'inverse de la porosité.
$$c = (V_{solide} / V_{total})$$

REMARQUE : La porosité et la compacité sont donc liées par la relation $n + c = 1$

- L'**indice des vides (e)** est le *rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume de solide présent dans l'échantillon*. Plus cet indice est élevé, plus la porosité est importante.
$$e = V_{vide} / V_{solide}$$

Tableau 2.XII - Valeurs moyennes de l'indice des vides.

SOLS	Indice des vides
Argile	0,3 - 1
Vase et tourbe	1 - 4
Limon	0,4 - 1
Sable	0,5 - 1

REMARQUE : La corrélation entre la porosité et l'indice des vides équivaut à $n = e / (1+e)$. Ainsi, pour un indice des vides égal à 1, la porosité est de 0,5.

Le *coefficient d'absorption d'eau (WA_{24h})* est l'essai le plus représentatif pour déterminer l'indice de vide. Il consiste à déterminer la différence de pesée d'un échantillon avant et après immersion dans l'eau durant 24 h à pression atmosphérique.
$$WA_{24h} = \Delta_{masse} / M_{sèche}$$

Une valeur faible (≤ 2) signifie que le sol est jugé insensible aux cycles gel-dégel.

2.3.2.4 Teneur en eau (*phase liquide*)

Il existe plusieurs types d'eau dans un sol :

- L'*eau interstitielle* est l'eau présente dans les espaces libres entre les grains. Elle se présente sous deux formes :
 - L'*eau libre* circule librement entre les grains. Elle a une grande influence dans les comportements physiques et mécaniques du sol. Lorsque l'eau libre remplit tous les vides, le milieu est dit *saturé* ;
 - L'*eau capillaire* est l'eau retenue entre les grains solides par des forces de capillarité (*adhésion*). Ce type d'eau est plus difficile à extraire ;

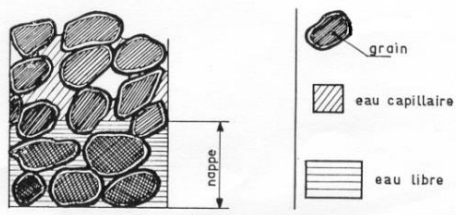


Figure 2.9 : Répartition de l'eau interstitielle dans le sol (Source : CRR).

- L'*eau adsorbée* concerne l'eau attachée à la surface des grains d'argile suite à des phénomènes électrochimiques. Son épaisseur (5 à 10 millimicrons ou °A) lui permet de jouer le rôle de lubrifiant entre les grains et d'avoir des propriétés d'un matériau semi-solide. Elle ne peut partir qu'après dessiccation totale et complète du matériau ;
- L'*eau de constitution* est l'eau présente dans le minéral. Elle n'intervient pas en géotechnique.

La *teneur en eau* d'un sol est le rapport du poids d'eau (W_{eau}) contenu dans le sol sur la masse solide du sol (W_{solide}).

$$\% \text{ eau} = \frac{W_{\text{eau}}}{W_{\text{solide}}}$$

REMARQUE : La définition reprise ci-dessus ne correspond pas à la définition agronomique où c'est le poids total (et non du matériau sec) qui est pris en compte.

Le *degré de saturation* ($S_r\%$) est défini comme le rapport de volume de vides effectivement occupés par l'eau au volume total des vides. $S_r = V_{\text{eau}}/V_{\text{total}}$. Il varie de 0 à 1 (échantillon saturé).

Plusieurs méthodes existent et sont réalisées, soit en laboratoire (*mesure lente mais relativement précise*), soit sur chantier (*mesure rapide et approximative*). Le principe est similaire pour beaucoup de méthodes : Peser l'échantillon avant et après séchage jusqu'à "masse constante" ("état sec"). La masse est considérée comme constante lorsque deux pesées successives de l'échantillon ne diffèrent pas de plus de 0,1 %. Les différences demeurent dans la manière de sécher l'échantillon.

REMARQUE : Dans certains cas, la perte de poids peut provenir de la déshydratation de certains cristaux (*gypse*) ou de la destruction de matières organiques. Si tel est le cas, il y a lieu de prévoir une analyse minéralogique ou chimique (*détermination des cristaux hydratés instables*) et une attaque préalable à l'eau oxygénée (*destruction de la matière organique*) et de remesurer le poids.

Les méthodes les plus fréquemment utilisées en génie civil sont :

- Le *séchage à l'étuve* est une méthode relativement précise de laboratoire qui consiste à sécher l'échantillon dans une étuve entre 105 et 110°C durant un certain temps afin de déterminer l'eau interstitielle. Le délai de mesure peut être long (*souvent plusieurs jours*) ;

REMARQUE : Le séchage est parfois réalisé à 55°C afin de ne pas engendrer certaines réactions (*réactions sulfatiques, décomposition de la matière organique, etc.*) mais dans ce cas, la valeur obtenue ne prend pas en compte l'eau capillaire qui intervient de manière importante dans le compactage. D'autre part, pour déterminer la teneur en eau adsorbée, une température de 300°C est nécessaire mais occasionne également d'autres réactions. C'est pourquoi cette température est rarement réalisée.

- La *mesure au four à micro-ondes* est une méthode rapide souvent réalisée sur chantier car elle ne dure que quelques minutes. La valeur fournie est moins précise que celle obtenue à l'étuve car la température n'est pas contrôlée. Cette technique ne convient pas pour les matériaux contenant de l'aluminium et autres éléments métalliques (*remblai à base de scorie ou de mâchefers*) ;
- La *mesure à la poêle chauffée au gaz* est également une méthode de chantier qui consiste à sécher dans un récipient métallique, un échantillon de sol en veillant à ne pas carboniser le matériau. Une couleur grise et l'absence de fumée sont généralement le signe d'un séchage bien avancé ;

- La *méthode de l'alcool à brûler* est aussi une méthode rapide de terrain qui consiste à peser l'échantillon avant et après brûlage avec de l'alcool. Cette technique très rarement utilisée, est à proscrire pour un sol riche en matières organiques car le brûlage détruit les composés organiques présents dans le sol.
- Le *gammadensimètre* est un dispositif équipé d'une source radioactive d'Américium 241 située, soit en surface, soit à faible profondeur (*de 5 à 30 cm*) qui émet des neutrons à haute énergie. Ces derniers se propagent dans le matériau et sont ralentis par collision successives avec les atomes qu'ils rencontrent. Ce ralentissement est d'autant plus important que la masse des atomes heurtés est faible. Ainsi, les éléments contenant de l'hydrogène contenant de l'eau (*sous toutes ses formes*) ralentissent fortement les neutrons. Lorsque le neutron est suffisamment ralenti, il est capté par un élément avec émission d'un rayon gamma secondaire qui peut être mesuré comme rayon gamma naturel par un dispositif situé en surface.

Il faut être prudent dans l'interprétation de la valeur car les neutrons peuvent être ralentis par d'autres sources d'hydrogène comme la matrice cimentaire, certains additifs et le bitume. Dans ce cas, la valeur mesurée a tendance à être plus élevée ;

REMARQUE : Cet appareil est principalement utilisé pour mesurer la densité *in situ* d'un empierrement, via une autre source radioactive. D'autre part, il nécessite une administration lourde pour ses déplacements, son stockage et sa manipulation, vu son caractère radioactive (*il est considéré comme une source radioactive comme une centrale nucléaire*).

- Le *Speedy Moisture Tester* est un appareil inséré dans le sol et mis au contact avec ce dernier au moyen d'un réactif (*carbure de calcium*) qui induit la vaporisation de l'eau (*sous forme de gaz acétylène*), entraînant une augmentation de la pression dans l'appareil. La teneur en eau de l'échantillon est alors lue directement sur l'appareil calibré sur base de la pression du gaz. Cet appareil convient uniquement pour un sol sableux.

La teneur en eau est très variable et dépend fortement de la nature du sol.

Tableau 2.XIII - Domaines de valeurs de teneur en eau selon la lithologie.

Type de sol	Teneur moyenne en eau (%)
Sol argileux	
<i>Argile raide et compacte</i>	10 - 20
<i>Argile moyenne</i>	20 - 60
<i>Argile molle</i>	50 - 200
<i>Vase et tourbe</i>	80 - 300
Sol limoneux	10 - 30
Sol sableux	5 - 35

La teneur en eau est un facteur important à déterminer dans plusieurs applications :

- *Elle conditionne les conditions de compactage* en jouant un rôle de lubrifiant. Il faut se rapprocher d'une teneur optimale pour le meilleur compactage et les meilleures caractéristiques mécaniques (*portance, résistances, etc.*) ;
- *Elle fixe le dosage du liant à utiliser dans le cas d'un traitement de sol* et ce, sur base d'une étude de formulation ;
- *Elle détermine le risque de gonflement ou de retrait* pour certains argiles et schistes.

Cependant, en terrassement, la valeur de la teneur en eau naturelle seule ne permet pas à elle seule de définir l'état hydrique d'un sol (*à l'extraction*) selon la classification française GTR. D'autres paramètres doivent être utilisés :

- Le *rapport W_{nat}/W_{OPN}* s'applique principalement aux états hydriques très secs à moyennement humides (*valeur inférieure ou égale à 1*) ;
- L'*Indice Portant Immédiat (IPI)* du sol à sa teneur en eau naturelle permet de caractériser les états hydriques humide à très humide ;
- L'*indice de consistance (IC = $(W_L - W_{nat})/I_p$)* est adapté aux sols fins (*% éléments de 63 μm > 35 % et $I_p > 12$*). Si la valeur d'IC est inférieure à 0,7, le sol est peu consistant et des problèmes de traficabilité sont prévisibles. Par contre, si la valeur est supérieure à 1,3, le sol est très consistant et des problèmes d'extraction sont prévisibles.

Tableau 2.XIV – Classification des états hydriques selon la classification française GTR (1992).

Etat hydrique	Caractéristiques
Etat très humide (th)	Etat d'humidité très élevée ne permettant pas la réutilisation du sol dans des conditions technico-économiques normales
Etat humide (h)	Etat d'humidité élevée autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (<i>aération, traitement au liant, ...</i>)
Etat moyennement humide (m)	Etat d'humidité optimale (<i>minimum de contraintes pour la mise en œuvre</i>)
Etat sec (s)	Etat d'humidité faible mais autorisant encore la mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (<i>arrosage, compactage, ...</i>)
Etat très sec (ts)	Etat d'humidité très faible n'autorisant plus la réutilisation du sol

A₁ Limons peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pcllés, arènes peu plastiques...	$IP_I^{(*)} \leq 3$ ou $W_n \geq 1,25 W_{OPN}$	A ₁ th
	$3 < IP_I^{(*)} \leq 8$ ou $1,10 \leq W_n < 1,25 W_{OPN}$	A ₁ h
	$8 < IP_I \leq 25$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$	A ₁ m
	$0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$	A ₁ s
A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	$W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₁ ts
	$IP_I^{(*)} \leq 2$ ou $I_c^{(*)} \leq 0,9$ ou $W_n \geq 1,3 W_{OPN}$	A ₂ th
	$2 < IP_I^{(*)} \leq 5$ ou $0,9 \leq I_c^{(*)} < 1,05$ ou $1,1 W_{OPN} \leq W_n < 1,3 W_{OPN}$	A ₂ h
	$5 < IP_I \leq 15$ ou $1,05 < I_c \leq 1,2$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$	A ₂ m
	$1,2 < I_c \leq 1,4$ ou $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$	A ₂ s
	$I_c > 1,3$ ou $W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₂ ts

Figure 2.10 : Extrait de la classification française GTR montrant la classification des états hydriques pour les sols de type A1 et A2 (Source : NF).

2.3.2.5 Perméabilité ou vitesse de circulation de l'eau

Sur base de l'hypothèse que l'eau circule dans un sol de manière laminaire bien qu'elle doive contourner les grains et les éventuelles couches d'eau adsorbée autour des grains d'argile ($v_{réelle} > v_{mesurée}$), la **loi de Darcy** (écoulement laminaire et lent) peut être appliquée.

$$V = k \cdot i \text{ (m/s)} \quad k : \text{coefficient de perméabilité (m/s)}$$

i : **gradient hydraulique** (hauteur de la colonne d'eau/ longueur parcourue : sans dimension).

La **perméabilité** (k) correspond à la **vitesse de circulation de l'eau dans le matériau**. Ce paramètre dépend principalement de la granulométrie et du taux de compactage.

REMARQUE : Il existe une différence entre la perméabilité et la porosité. Ainsi, deux sols de porosité identique mais de granulométrie différente présentent des perméabilités différentes en raison du fait que dans les sols fins, les interstices sont plus fins et que l'eau a donc difficile à circuler. De plus, les frottements et donc les pertes de charge sont plus élevés.

Il existe en réalité, plusieurs perméabilités :

- La **perméabilité en petit** est liée à la porosité du sol. Elle est représentative d'un milieu homogène ;

Tableau 2.XV – Valeurs moyennes de perméabilité en petit en fonction de la nature du sol.

Lithologie	Perméabilité moyenne	
UNITES	Unité en m/sec	Unité en m/h
Argile	$10^{-8} - 10^{-12}$	$10^{-6} - 10^{-10}$
Limon	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-4} - 10^{-6}$
Sable	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-2} - 10^{-4}$
Graviers	$10^{-2} - 10^{-4}$	$10 - 10^{-2}$

- La **perméabilité en grand** est liée à la présence de discontinuités préférentielles (*stratification, fractures, etc.*) et est mesurée uniquement sur le site par des essais de pompage. Les valeurs mesurées sont généralement élevées et influencent donc fortement la circulation d'eau dans le sol ;
- La **perméabilité verticale** et la **perméabilité horizontale** peuvent être différentes et avoir des influences distinctes ;

Ce paramètre est important à déterminer pour les matériaux ayant une fonction drainante (*sous-fondation, fondation drainante, sable drainante, etc.*) ou d'infiltration (*sol sous structure drainante*).

Tableau 2.XVI – Classification des sols sur base de leur perméabilité (Source : CRR).

Type de sols (selon perméabilité)	Valeur k (m/s)	Lithologie principale
Sol très perméable	$> 10^{-4}$	Graviers
Sol perméable	$10^{-6} - 10^{-4}$	Sable
Sol peu perméable	$10^{-8} - 10^{-6}$	Limon
Sol quasiment imperméable	$< 10^{-8}$	Argile

Plusieurs essais permettent de déterminer la perméabilité d'un sol :

- Les *formules d'estimation* fournissent une valeur approximative de la perméabilité en petit et sont uniquement valables pour un sol sableux. Plusieurs formules existent :
 - La formule d'Hazen : $k = 100 d_{10\%}^2$ avec d exprimé en cm ;
 - La formule du CRR (Van Ganse R., 1966) concerne les sables belges pauvres en fines (moins de 3 % d'éléments de diamètre inférieur à 20 μ m) : $k = 25 \cdot 10^{-8} d_{50}^2$ avec d exprimé en μ ;
- Les *essais en laboratoire* fournissent une valeur de la perméabilité en petit du sol puisque les discontinuités ne sont pas présentes. Ils sont basés sur la détermination du temps que met l'eau soumise à une certaine pression à traverser un échantillon de sol.
 - Les *perméamètres* sont les appareils les plus utilisés en laboratoire car ils fournissent une valeur relativement précise de la perméabilité ;

REMARQUE : La dimension du perméamètre dépend de la taille des grains du sol. Plus la taille est faible, moins la valeur de k est élevée et donc moins la distance s doit être importante ou plus longtemps dure l'essai. Il faut trouver le bon équilibre.

- La *méthode du moule* consiste à mesurer le temps de traversée de l'eau à travers un moule rempli d'un sol perméable (< 10 % fines) et compacté à une certaine densité. Cet essai fournit une valeur plus approximative ;
- Les *méthodes de terrain* sont plus réalistes car d'une part, le sol n'est pas remanié et d'autre part, elles prennent également en compte la perméabilité en grand. La valeur k mesurée est donc plus représentative. Plusieurs méthodes existent :
 - L'*essai "open-end"* consiste à disposer une colonne d'eau sur une hauteur constante de 1 m et à déterminer la quantité d'eau ajoutée en continu durant 20 minutes ;
 - La *méthode du puits* est un essai plus rapide mais moins précis qui consiste à réaliser un puits de 50 cm x 50 cm creusé dans le sol sur 50 cm de profondeur. Une fine couche de gravillons est disposée dans le fond. Par la suite, il faut mesurer le temps nécessaire pour évacuer 5 l d'eau hors du trou. L'essai est répété 3 fois ;

$$k = Q_{\text{eau}} (l) / T (\text{sec}) / \text{Surface du puits} (m^2) / 1000$$

- La *méthode de l'anneau* consiste à enfoncer légèrement dans le sol, un tube cylindrique en acier, à le remplir d'eau et à mesurer le temps nécessaire pour infiltrer un certain volume. La même formule que la méthode du puits est appliquée ;
 - La *méthode du double anneau* consiste à introduire deux anneaux de diamètre différent légèrement dans le sol et à verser de l'eau dans la partie annulaire située entre les deux anneaux de manière à créer une colonne verticale d'eau. La mesure consiste par la suite à déterminer la quantité d'eau absorbée par le sol située dans le cercle interne en un certain temps ;
 - Les *essais de pompage* consistent à pomper à partir d'un puit et sur une certaine hauteur, l'eau présente dans la nappe et à ainsi déterminer le débit maximal ainsi que le cône de rabattement (via des piézomètres relativement proches). Cet essai réalisé pour des projets où d'importantes venues d'eau sont à prévoir (*déblai important*), permet d'estimer le débit à pomper ;
 - Les *essais Lefranc et Lugeon* sont des essais de perméabilité réalisés dans un trou de forage et en cours de foration.

REMARQUE : Il est impossible de prédire avec une certaine précision, la perméabilité d'un sol car celle-ci est influencée par la teneur en fines, l'arrangement des grains, la nature de certains éléments (*hydrocarbures, granulat poreux, argile, etc.*) et le chemin d'écoulement de l'eau.

2.3.3 Caractéristiques chimiques

Certains composants chimiques du sol peuvent engendrer des comportements néfastes, notamment lors du traitement de sol ou si ce dernier est en contact avec des éléments de nature divers (*béton, acier, etc.*). Il importe donc de les déterminer au préalable.

2.3.3.1 pH ou acidité

Le **pH** (cologarithme de la concentration en ions H^+) est un *coefficient qui caractérise la concentration d'ions H^+ dans le sol et la phase liquide*. Sa valeur varie de 0 à 14 avec un point neutre à proximité de 7.

$$pH = - \log [H^+]_{sol}$$

Le comportement des éléments avoisinants (*béton, acier*) va être influencé par le pH du milieu. De même, certaines plantes ne peuvent pas pousser sur un sol acide ($pH < 6$) tandis que d'autres s'en accommodent.

REMARQUE : La présence d'ions calcium (*chaux vive et ciment*) influence le pH et rend le sol plus basique. Ce traitement permet de neutraliser l'acidité d'un sol, notamment situé sur un bedrock siliceux (*granite, etc.*).

Tableau 2.XVII- Classification sommaire des sols sur base de leur pH.

pH	Types de sol
< 4,5	Sol très acide
4,5 - 6	Sol faiblement acide
6 - 7	Sol neutre et équilibré
> 7	Sol basique, calcaire ou salé
10- 12	Sol traité à la chaux

REMARQUE : Le pH constitue un indicateur pour vérifier si un sol a été traité ou non à la chaux. Par contre, il ne permet de déterminer la teneur en CaO utilisée.

Les différents méthodes pour déterminer ou estimer le pH d'un sol sont :

- Les *méthodes de chantier* consistent à utiliser à mesurer le pH de l'eau du sol via un pHmètre, une sonde électronique ou une languette de colorants qui change de couleur selon le pH. Cela fournit une valeur approximative souvent suffisante aux besoins du géotechnicien ;
- Les *essais en laboratoire* fournissent des valeurs précises mais nécessitent un délai plus long ;
- La *présence de certaines plantes* : La présence de chêne liège, de châtaignier ou de pin maritime est généralement typique d'un sol acide ;
- La *présence de roches affleurantes* : La présence de roches calcaire est le témoin d'un sol basique alors que les roches siliceuses témoignent souvent d'un sol acide ;
- L'*essai à l'acide chlorhydrique* permet de déterminer la présence de carbonates dans le sol et donc de confirmer sa basicité.

2.3.3.2 Teneur en matières organiques (MO)

La *matière organique* (MO) est la *matière fabriquée par les êtres vivants* et est composée de différentes fractions :

- Les *résidus de plantes, de racines et d'organismes* de toute taille et en voie de décomposition constituent la matière organique particulaire. Ce matériau évolue en fonction du temps ;
- Les *micro-organismes* et la *microfaune du sol* (*agents de décomposition*) ;
- Les *produits secondaires de l'activité microbienne* (*fraction soluble, polysaccharides, etc.*) ;
- L'*humus* est une *substance colloïdale qui résulte de la transformation des sous-produits de la décomposition microbienne et des résidus de végétaux*. Cette fraction représente la composante stable de la MO et peut persister pendant plusieurs années dans le sol, surtout quand l'humus est intimement lié à la matrice minérale du sol (*argile et limon*).

La matière organique peut modifier certains comportements du sol, notamment lors du traitement de ce dernier par un liant. Étant donné le changement de pH, la matière organique a tendance à absorber une partie du liant afin de conserver la neutralité du milieu. Cela diminue donc l'efficacité du traitement et provoque un retard de prise avec diminution des résistances. Mais elle peut également capter une importante quantité d'eau et augmenter la plasticité et la compressibilité de certains sols fins.

Un sol est souvent considéré comme sol organique lorsque la teneur en MO dépasse 3%.

De nombreuses méthodes existent et ne sont pas toujours corrélables entre elles. Il est donc important de toujours préciser la méthode utilisée. Le présent chapitre décrit les principales méthodes utilisées en géotechnique.

a. Méthode à l'hydroxyde de sodium (NaOH- EN 1744-1 §15)

Cette méthode qualitative figure actuellement dans les normes européennes pour granulat.

Elle ne fournit pas une valeur précise de teneur mais une teinte à comparer à celle d'un matériau de référence. Si la teinte se révèle plus claire que la teinte standard, le granulat peut être considéré comme exempt de matières organiques. Si la teinte est plus foncée, des tests supplémentaires (*teneur en acides fulvoïque et humique*) doivent être réalisés.

b. Méthode d'attaque à l'eau oxygénée (H₂O₂)

L'eau oxygénée ou peroxyde d'hydrogène réagit chimiquement avec la matière organique en décomposition pour la détruire selon la réaction $C_6H_{12}O_6 + 2 H_2O_2 + 5 O_2 \leftrightarrow 8 H_2O + 6 CO_2 \uparrow$ (*effervescence*).

Le principe de la méthode consiste à déterminer la perte de masse de l'échantillon avant et après l'attaque.

c. Méthode au dichromate de potassium (KCr₂O₇)

La méthode au dichromate de potassium consiste à déterminer la Demande Chimique en Oxygène (DCO) qui correspond à la masse du dioxygène dissous dans l'eau et nécessaire à l'oxydation ultime de la molécule organique. Le dichromate de potassium est un oxydant puissant qui oxyde même ce que l'oxygène O₂ ne peut oxyder comme le charbon et le goudron. Il transforme tous les atomes qui contiennent du carbone (C) et le transforme en CO₂ et H₂O.

L'essai consiste à déterminer la quantité d'ions dichromate nécessaire à l'oxydation complète d'une solution à tester par titrage dans une solution de Fe(II) de concentration connue.

REMARQUE : Cette opération n'est plus trop pratiquée de nos jours, vu le caractère cancérigène du dichromate de potassium.

d. Méthode de la perte au feu

La matière organique brûle à partir de 550°C en donnant du CO₂ et du C. Cela se traduit par une perte de masse. D'autres matières peuvent être également brûlées à cette température et influencer le résultat.

e. Méthode du Carbone total et inorganique

Dans le domaine agricole, la teneur en MO du sol est généralement calculée à partir du taux de carbone organique en multipliant ce dernier par 1,724.

Certains laboratoires utilisent une méthode non normalisée basée sur la détermination du carbone total (*carbone organique + carbone inorganique*) au moyen d'un analyseur carbone - soufre et du carbone inorganique par dosage volumétrique (*mesure du volume de CO₂ dégagé par une attaque acide du sol à température et pression contrôlées*). Ces deux valeurs permettent dès lors de déduire la teneur en carbone organique et par calcul de déterminer la quantité de matières organiques.

f. Essai Von Post (NF P94-058)

Cet essai permet d'apprécier l'état de décomposition des matières organiques. Il s'applique aux sols contenant plus de 10% de MO.

2.3.3.3 Teneur en soufre, sulfures et sulfates

Le soufre contenu dans le sol sous forme de soufre pur (*cas rare*), de sulfure (*pyrite*) ou plus fréquemment de sulfates (*gypse, anhydrite, etc.*) peut réagir avec les composants du ciment pour former après quelques temps, des minéraux gonflants de type ettringite secondaire ou thaumasite. Cela engendre alors une déstructuration du sol lié et donc une perte de ses caractéristiques mécaniques.

Cette teneur est particulièrement importante à déterminer lors d'un traitement du sol au liant hydraulique. Plusieurs essais existent :

- La *teneur totale en soufre* (S)
- La *teneur en sulfates solubles dans l'eau* (SS)
- La *teneur en sulfates solubles dans l'acide* (AS).

2.3.3.4 Teneur en chlorures, nitrates et phosphates

D'autres éléments présents dans le sol de manière naturelle (*géologie*) ou anthropique (*pollution, sels de déneigement, etc.*) peuvent également occasionner des dégâts en cas de traitement de sol.

- Les **chlorures** présents principalement dans les sols en contact avec l'eau de mer et le sel de déverglaçage, ont des réactions indésirables en présence de béton. Il accélère la prise, corrode les armatures et génère des minéraux chloro-aluminates gonflants. Le test le plus fréquent est l'essai de dosage en ions solubles dans l'eau ;
- Les **nitrates** inhibent ou retardent la prise hydraulique ;
- Les **phosphates** inhibent ou retardent également la prise hydraulique. Plusieurs méthodes existent et leur utilisation varie d'une région à l'autre. La région wallonne réalise la méthode à l'acétate ammonique EDTA à pH 4,65 alors que la région flamande pratique la méthode à l'acétate lactate en présence d'acide acétique.

REMARQUE : Vu la complexité des méthodes de mesure, la réalisation de ces essais ne doit envisagée que lorsqu'un soupçon existe sur la présence de tels constituants dans le sol (*selon les informations récoltées préalablement*).

2.3.3.5 Capacité d'absorption

La **capacité d'absorption** est le *pouvoir de fixation des ions minéraux sur les colloïdes due à des phénomènes électriques*. Les complexes colloïdales électronégatifs absorbent les cations libres en particulier les cations métalliques (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et appelés *bases échangeables*.

Ainsi, cette capacité qui dépend de la teneur du sol en colloïdes et en cations disponibles, détermine la fertilité naturelle du sol. C'est grâce également à ses propriétés que l'on peut améliorer le sol (*l'ajout de fertilisant enrichit le sol en bases échangeables*).

2.3.4 Caractéristiques de durabilité

La **durabilité** d'un sol peut se définir comme *sa capacité à conserver dans le temps, ses caractéristiques initiales face aux différentes sollicitations auxquelles il sera soumis lors de sa vie*. Ainsi, un sol est dit **non durable** s'il perd ses propriétés dans un délai relativement court.

Or, tout sol situé à proximité de la surface, peut être soumis à deux familles de sollicitations différentes :

- Les **sollicitations mécaniques** concernent les sollicitations qui provoquent des réactions mécaniques entre les grains comme la fragmentation par impact, l'usure par attrition, le cisaillement, la compression, le broyage ou encore le frottement. Ces sollicitations concernent principalement les éléments grossiers ;
- Les **sollicitations climatiques** sont liées à l'action de l'eau et/ou de la chaleur qui provoquent des cycles d'alternance dans le milieu comme par exemple, les alternances gel - dégel également appelées gélivité, sec - humide, chaud - froid, *etc.* La première sollicitation est souvent la principale responsable des dégradations observées dans nos contrées. Dans les pays chauds, c'est la variation de température qui prédomine.

Seuls, les sols grossiers (*sable, cailloux, gravier*) peuvent subir des modifications granulométriques qui perturbent leurs comportements. C'est la raison pour laquelle le lecteur est invité à lire le dossier du géotechnicien "Granulats" (*en cours de rédaction*) pour de plus amples renseignements sur ces essais (*Micro-Deval en présence d'eau, Los Angeles, etc.*). Toutefois, le présent chapitre reprend l'interprétation de quelques essais plus fréquemment utilisés pour les sols grossiers.

2.3.4.1 Sollicitations mécaniques

- L'**essai de fragmentabilité des éléments grossiers évolutifs** ($D < 50 \text{ mm}$ - NF P 94-066) consiste à déterminer l'aptitude d'un sol rocheux à se fragmenter sous l'effet de sollicitations mécaniques lors de l'extraction et de la mise en œuvre. Il consiste à déterminer la réduction du D_{10} (*dimension en mm en dessous de laquelle se situe 10 % de la masse du matériau granulaire*) d'un échantillon d/D donné soumis à un pilonnage conventionnel. L'essai est réalisé sur la fraction 10/20.

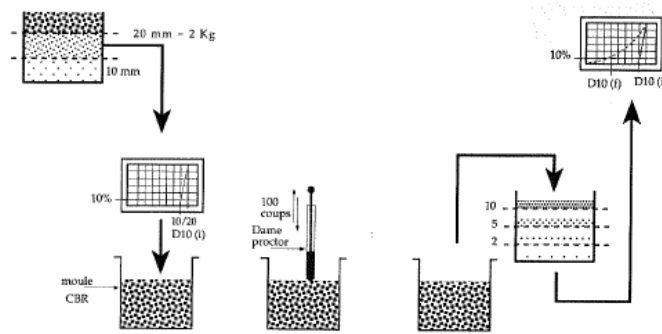


Figure 2.11 : Schéma de l'essai de fragmentabilité des matériaux rocheux.

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant pilonnage}}{D_{10} \text{ du matériau après pilonnage}}$$

Plus la valeur de FR est élevée, plus le matériau est fragmentable.

Ce paramètre vise les possibilités d'emploi en terrassement de matériaux rocheux évolutifs et de certains matériaux rocheux friables pour lesquels les coefficients LA et MD_E manquent de sensibilité. Plus la valeur est élevée, plus le matériau peut être facilement valorisé en remblai. La classification GTR a retenu le seuil de 7 pour classer les roches évolutives ou friables.

Tableau 2.XVIII - Classification des matériaux rocheux selon le coefficient de fragmentabilité (FR) (GTR).

FR	Types de roches
≤ 7	Roche peu fragmentable
> 7	Roche fragmentable

- L'abrasivité de la fraction grenue (Ø > 80 µm) permet d'estimer l'usure des outils de malaxage.

2.3.4.2 Sollicitations climatiques

- Le coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux évolutifs (D > 50 mm - NF P 94-067) consiste à déterminer l'aptitude d'un matériau rocheux argileux à se dégrader sous l'action combinée des agents climatiques ou hydrogéologiques (gel, cycles imbibition – séchage) et des contraintes mécaniques. Il consiste à déterminer la réduction du D₁₀ (dimension des grains en mm en dessous de laquelle se situe 10 % de la masse du matériau granulaire) d'un échantillon d/D donné soumis à quatre cycles imbibition – séchage conventionnels. L'essai est réalisé sur la fraction 10/20.

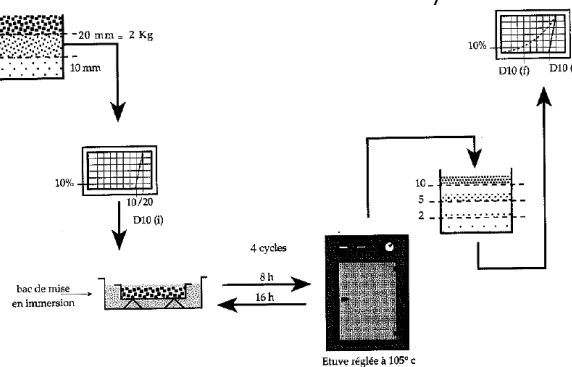


Figure 2.12 : Schéma de l'essai de dégradabilité des matériaux rocheux.

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant 1}^{\text{ème}} \text{ cycle}}{D_{10} \text{ du matériau après 4}^{\text{ème}} \text{ cycle}}$$

Plus la valeur de DG est élevée, plus le matériau est fragmentable et donc possible à traiter.

Ce paramètre vise les possibilités d'emploi en terrassement de matériaux rocheux argileux. La classification GTR a retenu les seuils de 5 et 20 pour classer les roches argileuses.

Tableau 2.XIX - Classification des matériaux rocheux selon le coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux (DG) (GTR).

DG	Types de roches
≤ 5	Matériau rocheux peu dégradable
5 - 20	Matériau rocheux moyennement dégradable

> 20	Matériau rocheux très dégradable
------	----------------------------------

- L'essai de susceptibilité aux cycles gel - dégel traduit le phénomène de *cryosuccion* ou *gélifonflement* qui apparaît dans un sol fin sensible à l'eau et situé à une relativement faible distance de la nappe phréatique (de quelques centimètres à une dizaine de mètres selon la nature des terrains meubles). Ce phénomène est particulièrement important à déterminer dans le cas de sol-support d'ouvrages linéaires.

Le processus de *cryosuccion* se passe en 2 étapes :

- En période de gel (cas a de la figure), se développe dans la structure supérieure, une zone gelée qui, par effet de succion, pompe l'eau de la nappe. Cela gorge dans un premier temps, la zone directement située sous la structure qui gèle ensuite pour former et développer une lentille de glace au sein de cette couche et provoque le soulèvement de la structure située au-dessus ;
- Lors du dégel (cas b de la figure), un front de dégel se développe à partir de la surface et progresse vers la profondeur. Il dégèle ainsi l'eau de la structure et de la partie supérieure du sol. Les soulèvements de surface tendent ainsi à se réduire. Cependant, l'eau redevenue liquide ne peut rejoindre la nappe suite à la présence d'une barrière de gel située en-dessous. L'eau ainsi bloquée sature le sol et lui fait perdre toutes ses propriétés de consistance et de portance (pour autant que ce sol soit suffisamment sensible à l'eau) ; ce qui génère des phénomènes d'orniérage et des fissures de fatigue au niveau du revêtement.

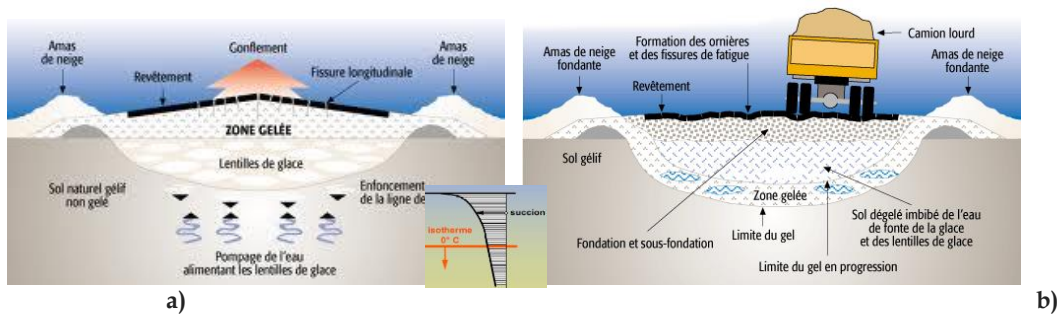


Figure 2.13 : Principe de la cryosuccion en période de gel (a) et de dégel (b).

Le principal essai réalisé en France et en Belgique pour déterminer un tel impact est l'*essai français de cryosuccion* ou *essai de gélifonflement* (NF P98 234-2). Cet essai concerne les sols traités ou non.

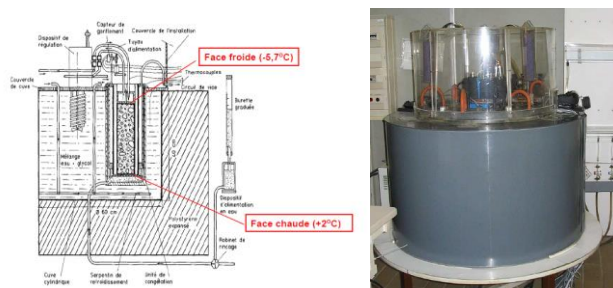
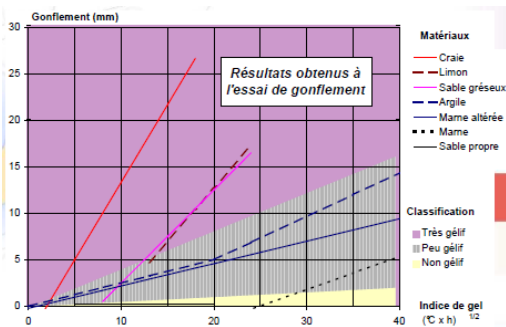


Figure 2.14 : Schéma et photo du dispositif de l'essai de gélifonflement.



Type de sol	Dénomination française	Valeur de la pente $\Delta X_C / \Delta I^{1/2}$
Sol non gélif	SGn	< 0,05
Sol peu gélif	SGp	0,05 - 0,4
Sol très gélif	SGt	> 0,4

Figure 2.15 : Exemples de droites obtenues lors de l'essai de gélifonflement pour différents matériaux et critères généralement requis.

La valeur de la pente permet de classer les sols en 3 catégories :

- *Le sol non gélif* se congèle en masse sans changement marqué dans sa structure ou son contenu en eau. Un léger gonflement (jusqu'à 9%) de la structure globale peut être présent pour un sol contenant initialement beaucoup d'eau. Cette catégorie concerne principalement les sols

pulvérulents (*sable et cailloux contenant peu de fines*) ainsi que l'argile pure très plastique (*peu de pénétration d'eau dans la structure*) ;

- *La sol peu gélif* se caractérise par l'apparition de déformations faibles à moyennes au sein de sa structure. Cette catégorie concerne notamment l'argile pure non plastique et la marne ;
- *La sol gélif* se caractérise par l'apparition de déformations importantes au sein de sa structure. Cette catégorie regroupe généralement les sols fins cohérents (*limon, argile et sable impurs, craie*).
- **L'estimation de la susceptibilité au gel des sols** : Dans certains cas, l'essai ci-dessus ne peut être réalisé (*temps, budget, etc.*). Une estimation de la susceptibilité au gel peut être établie sur base d'un des 2 paramètres suivants :
 - *Les valeurs de résistances à la compression et à la traction* permettent également d'estimer la susceptibilité du matériau au gel - dégel.

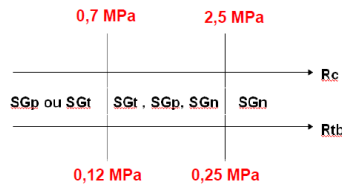
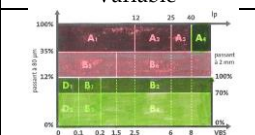


Figure 2.16 : Estimation de la susceptibilité d'un sol au gel à partir des résistances à la compression et à la traction.

- *La classification GTR* permet de faire une estimation qui doit être majorée d'un certain coefficient de risque à déterminer par le concepteur dans le calcul d'un dimensionnement grâce à l'acquisition d'un grand nombre de données acquises depuis les années 1970. Les classes peuvent varier d'un auteur à l'autre comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 2.XX - Tableau synoptique des sols sur base de leur susceptibilité au gel selon le GTR, la ville de Lyon et l'expérience du CRR (De Bel R.).

Classe	Description	Susceptibilité selon GTR	Susceptibilité selon Région de Lyon	Susceptibilité selon R.DE BEL (CRR)
A1	Limon à sable	Gélif	Gélif	Gélif
A2	Limon à argile	Gélif	Gélif	Gélif
A3	Argile	Peu gélif	Gélif	Gélif
A4	Argile plastique	Peu gélif	Peu gélif	Non gélif
B1	Sols sableux et graveleux comportant des fines		Peu gélif	Non gélif
B2		Gélif	Peu gélif	Non gélif
B3		Gélif	Peu gélif	Non gélif
B4			Peu gélif	Non gélif
B5		Gélif	Gélif	Gélif
B6		Gélif	Gélif	Gélif
CiAi	Sols comportant des fines et des gros éléments			
CiBi				
D1	Sols insensibles à l'eau		Non gélif	Non gélif
D2			Non gélif	Non gélif
D3			Non gélif	Non gélif
R	Roches			Variable
Synthèse				

2.4 ETUDE DE COMPORTEMENT

Le comportement du sol face aux différentes contraintes exercées (*compression, cisaillement, etc.*) dépend principalement de la répartition des contraintes entre les éléments solides, via les contacts intergranulaires et la phase liquide, via la *pression interstitielle* (u). Plus il y a de l'eau, plus cette dernière est importante.

En présence de trop fortes contraintes, les déformations non linéaires se transforment en glissement qui conduisent à la destruction de la structure du sol.

2.4.1 Compactage

2.4.1.1 Essais et courbes Proctor

L'essai Proctor consiste à compacter selon la même énergie de compactage, un certain nombre d'éprouvettes (généralement 5) du même sol mais caractérisées par des teneurs différentes en eau au moment du compactage et à mesurer pour chacune, la masse volumique sèche (ρ_d), voire humide. L'ensemble des résultats est ensuite reporté sur un graphe $\rho_d - \%_{\text{eau}}$. Les points sont reliés entre eux par une courbe appelée *Courbe Proctor* dont la forme caractéristique de chaque sol est généralement celle d'un dôme.

Le point supérieur appelé *Optimum Proctor* correspond au compactage maximal du sol (*valeur maximale de la masse volumique sèche* : $\rho_{d\text{max}}$) obtenu pour une certaine teneur en eau appelé *teneur en eau à l'optimum Proctor* (w_{OPT}) et pour une énergie de compactage déterminée.

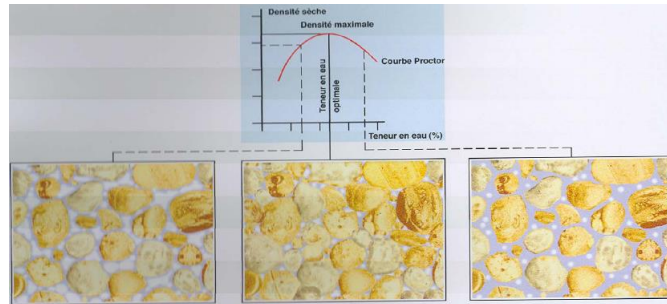


Figure 2.17 : Principe de l'essai PROCTOR.

Plusieurs essais Proctor existent dont les principales caractéristiques sont reprises ci-dessous :

- L'*essai Proctor normal* (OPN) correspond à une énergie de compactage de 592 kJ/m³. Il est réalisé principalement pour les couches de remblai et de sous-fondation ;
- L'*essai Proctor modifié* (OPM) correspond à une énergie de compactage de 2 695 kJ/m³, soit 4,55 fois plus élevée que l'énergie de compactage du Proctor normal. Il est réalisé pour représenter les couches routières supérieures (*fondation, revêtement*), donc rarement pour un sol.

Ces essais peuvent être réalisés dans deux types de moules :

- Le *moule Proctor* est utilisé uniquement pour l'essai Proctor ;
- Le *moule CBR* est utilisé dans le cas où un essai CBR ou IPI (*voir plus loin*) est réalisé par la suite.

Tableau 2.XXI - Principales caractéristiques des essais Proctor.

Proctor normal		
Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR
Masse de la dame	2490 g	2490 g
Diamètre de la dame	51 mm	51 mm
Hauteur de chute	305 mm	305 mm
Nombres de couches	3	3
Nombre de coups par couche	25	56
Masse par couche	650 g	1700 g

Proctor modifié		
Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR
Masse de la dame	4535 g	4535 g
Diamètre de la dame	51 mm	51 mm
Hauteur de chute	457 mm	457 mm
Nombres de couches	5	5
Nombre de coups par couche	25	56
Masse par couche	400 g	1050 g

L'essai Proctor fournit une information sur la teneur en eau optimale pour compacter le sol ainsi que le comportement à l'eau du matériau lors du compactage.

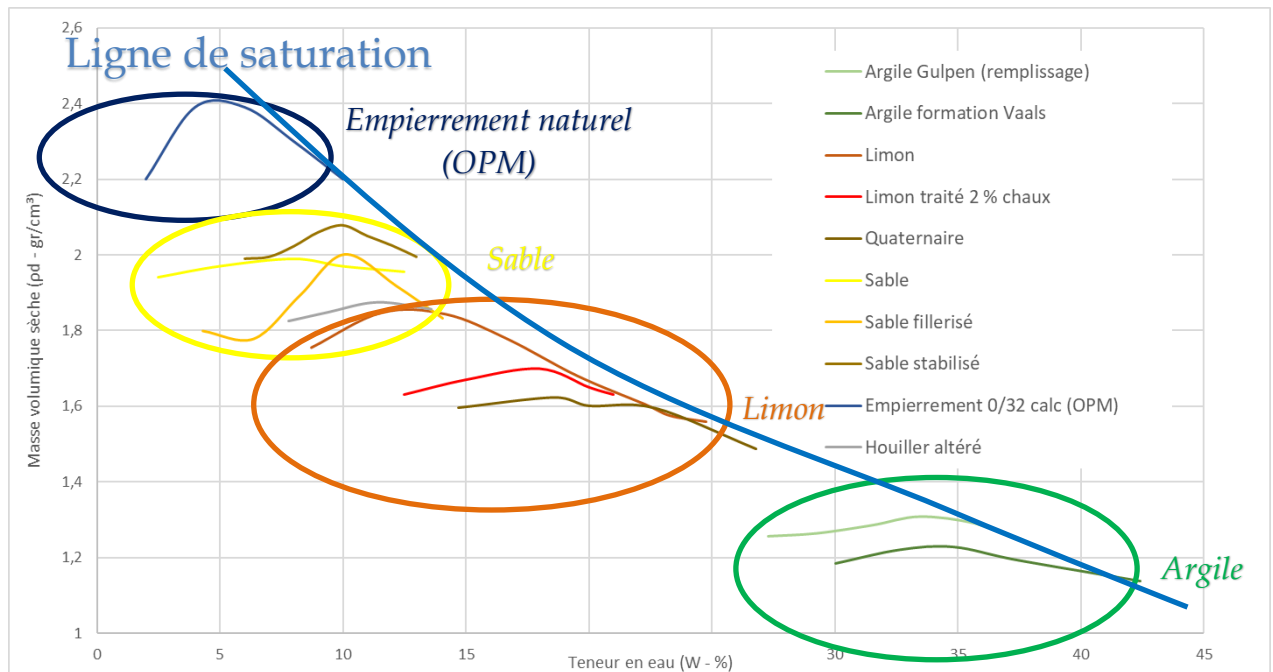


Figure 2.18 : Quelques exemples de courbes Proctor principalement normal pour les sols et granulats naturels (Source : JB Conseils).

La figure ci-dessus montre les remarques suivantes :

- Les **différents matériaux naturels s'alignent selon une courbe** parallèle à la ligne de saturation des matériaux ;
- L'**argile** se caractérise par une faible valeur de masse volumique sèche à l'Optimum Proctor normal (OPN) comprise entre 1,150 et 1,350 gr/cm³, une teneur en eau à l'Optimum Proctor comprise entre 30 et 40 % et une sensibilité moyenne à l'eau lors du compactage, même pour une argile gonflante ;
- Le **limon** présente une valeur de masse volumique à l'Optimum Proctor normal (OPN) comprise entre 1,600 et 1,850 gr/cm³, une teneur en eau à l'Optimum Proctor comprise entre 10 et 20 % et une certaine sensibilité à l'eau lors du compactage. Le quaternaire est souvent présent sous forme de limon argileux (exemple de la figure) à finement sableux ;
- Le **limon traité à la chaux** a une valeur optimale de masse volumique sèche plus faible en raison de l'ajout d'un matériau moins dense et une teneur en eau plus élevée, ce qui permet de traiter un sol caractérisé par une teneur en eau naturelle plus importante ;
- Le **sable** présente une valeur de masse volumique à l'Optimum Proctor normal (OPN) comprise entre 1,800 et 2,100 gr/cm³, une teneur en eau à l'Optimum Proctor comprise entre 5 et 12 % et une faible sensibilité à l'eau lors du compactage pour un sable pur (courbe peu prononcée). Par contre, un sable contenant des fines sous forme de ciment ou de filler est beaucoup plus sensible à l'eau durant le compactage. Le terrain houiller est issu de l'altération de schiste et de grès et se présente sous forme d'un sable limoneux ;
- L'**empierrement naturel (calcaire)** présente une valeur de masse volumique à l'Optimum Proctor modifié (OPM) comprise entre 2,100 et 2,500 gr/cm³, une teneur en eau à l'Optimum Proctor comprise entre 3 et 8 % et une certaine sensibilité à l'eau lors du compactage pour un empierrement seul. Par contre, une grave contenant de nombreuses fines sous forme de ciment ou de éléments inférieurs à 63 µm est beaucoup plus sensible à l'eau durant le compactage ;

2.4.1.2 Essais IPI et CBR

Ces deux essais à la méthodologie similaire s'appliquent à des matériaux dont le diamètre maximal ne dépasse pas 1/5 du diamètre du poinçon, soit 10 mm.

L'essai réalisé sur une éprouvette préalablement compactée à l'énergie Proctor normal ou modifiée dans un moule CBR, consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour enfoncer, un poinçon cylindrique de 49,6 mm de diamètre à vitesse constante (1,27 mm/min) sur une profondeur de 2,5 et 5 mm Cet enfoncement se fait à l'aide d'une presse. Une quantité de 5 à 10 kg d'échantillon est nécessaire pour chaque éprouvette. La teneur en eau est mesurée directement après l'essai.

La différence entre les deux essais réside dans le fait que lors de l'essai CBR, la partie supérieure est recouverte d'une surcharge alors que lors de l'essai IPI, il n'y a pas de surcharge.

L'enregistrement continu de l'enfoncement fournit une courbe dans le graphe pression - profondeur d'enfoncement. Cette courbe après correction éventuelle est comparée avec une courbe d'un matériau de référence (*grave concassée de Californie*).

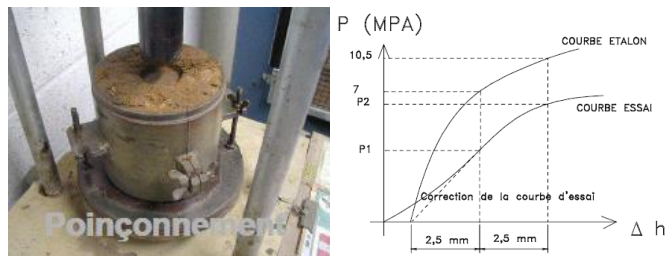


Figure 2.19 – Exemple de poinçonnement IPI et des résultats d'enfoncement pour l'essai CBR.

L'obtention de l'indice se calcule à partir des valeurs obtenues à 2 profondeurs distinctes (2,5 et 5 mm) selon les formules ci-dessous :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (kN)} \times 100}{7 \text{ (CBR) ou } 13,5 \text{ (IPI)}}$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (kN)} \times 100}{10,5 \text{ (CBR) ou } 20 \text{ (IPI)}}$$

La plus grande des 2 valeurs est retenue comme valeur d'indice IPI ou CBR.

Les essais réalisés sur les différentes éprouvettes de l'essai Proctor permettent d'obtenir un diagramme CBR ou IPI en fonction de la teneur en eau à comparer avec la courbe Proctor.

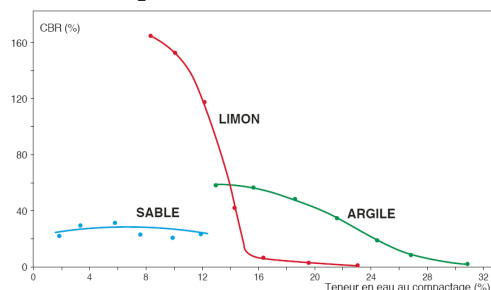


Figure 2.20 : Exemple de graphe CBR – Teneur en eau et de courbe Proctor.

Trois remarques concernant le comportement des différents matériaux peuvent être déduites.

- *Les valeurs de CBR et d'IPI sont relativement stables pour la branche sèche (partie située à gauche de l'Optimum Proctor) mais connaissent une diminution plus ou moins importante pour la branche humide.* Ce comportement est particulièrement bien marqué pour les limons où les valeurs IPI et CBR chutent fortement pour de faibles variations de teneur en eau ;
- *La chute des valeurs d'IPI et CBR débutent généralement pour une teneur inférieure à l'Optimum Proctor.* Ainsi, dans l'exemple de la figure, la chute de l'indice CBR commence à une teneur en eau proche de 11 % alors que la teneur à l'Optimum Proctor de ce même matériau est de 12 %.
- *Le sable est insensible à l'eau.*

REMARQUE : Les résultats observés en laboratoire ne sont pas nécessairement obtenus en pratique en raison de l'importance sur chantier de la portance de la couche sous-jacente, de l'exécution et du matériel utilisé. De plus, l'essai en laboratoire est réalisé sur un échantillon de sol dont le diamètre maximal n'excède pas 20 mm ; ce qui n'est pas nécessairement le cas sur chantier.

a. Essai IPI ou Indice Portant Immédiat

L'essai IPI permet d'évaluer l'aptitude d'un sol à supporter rapidement la circulation des engins. Il est réalisé tel quel, sans surcharge imposé au-dessus de l'éprouvette. Ainsi, les grains situés à proximité du poinçon peuvent se déplacer vers le haut et former un bourrelet en surface à côté du poinçon ; ce qui représente assez bien le comportement d'un engin circulant sur le matériau.

La valeur d'IPI dépend principalement de la nature des terrains et de la teneur en eau (*principalement coté humide*). Le tableau suivant reprend les principaux critères généralement admis pour la classification GTR (*influence de la teneur en eau*) et les guides pratiques du CRR pour une classification française des sols.

L'essai IPI ne convient pas pour :

- Un *sol très mou* ($\%_{CBR} < 2$) : Un essai scissométrique est préféré ;
- Un *matériau dont le diamètre des grains est supérieur à 10 mm* présente des résultats aléatoires.

D'un point de vue pratique, il importe de connaître les caractéristiques hydriques d'un sol sensible à un moment donné sur le chantier surtout dans le cas d'un état humide et très humide car cela traduit concrètement la difficulté des engins à circuler sur ces matériaux. Ce paramètre est peu efficace dans le cas de sol sec et très sec. Cependant, il n'existe pas de limites bien spécifiques car elles sont fonction du type de matériau considéré.

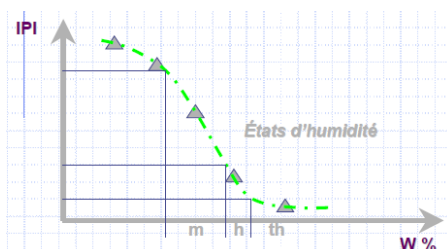


Figure 2.21 : Expression des résultats d'IPI en fonction de la teneur en eau et classification des états hydriques dans la branche humide.

Tableau 2.XXII : Valeurs d'IPI généralement accepté comme critère de compactage pour la classification GTR et dans les guides pratiques du CRR et comme critère de traitement en fonction de la nature des terrains.

Type de sol	Humidité du sol	IPI (GTR)	IPI (Guide CRR)	IPI traitement (Guide CRR)	Caractéristiques
A 1 Limon peu plastique, loess, sable fin, ...	Moyennement humide Humide Très humide	8 - 25 3 - 8 0 - 3	10 - 20	8	Changement brutal de comportement pour faible variation de teneur en eau
A 2 Sable fin argileux, limon, argile et marne peu plastiques, ...	Moyennement humide Humide Très humide	5 - 15 2 - 5 0 - 2	7 - 15	5	Comportement idéal pour le terrassement
A 3 Argile et argile marneuse, limon plastique	Moyennement humide Humide Très humide	3 - 10 1 - 3 0 - 1	5 - 15	5	Sol collant ou glissant à teneur importante en eau. Faible variation de comportement liée à leur perméabilité réduite
A 4 Argile et marne très plastique	Moyennement humide Humide Très humide	A définir par étude spécifique	5 - 10	3	Sol très cohérent, imperméable et présentant des phénomènes de gonflements ou de retrait
B 1 Sable limoneux	Etude spécifique		15 - 30	12	Sol insensible à l'eau
B 2 Sable argileux	Humide Très humide	4 - 8 0 - 4	7 - 15	5	Sol perméable et sensible à l'eau (selon teneur en fines)
B 3 Grave limoneuse	Etude spécifique		15 - 30	12	Sol insensible à l'eau
B 4 Grave argileuse	Humide Très humide	7 - 15 0 - 7	20 - 40	15	Sol perméable et sensible à l'eau (selon teneur en fines)
B 5 Sable et grave très limoneux	Moyennement humide Humide Très humide	12 - 30 5 - 12 0 - 5	15 - 30	12	Comportement semblable à A1
B 6 Sable et grave très argileux	Moyennement humide Humide Très humide	10 - 25 4 - 10 0 - 4	7 - 15	5	Comportement semblable à un sol fin mais avec une plus grande perméabilité
Famille C Sols comportant des fines et des gros éléments	cfr. description ci-dessus.		Variable	---	Mélange de comportement (fines et éléments grossiers)
Famille D Alluvions sableux à graveleux	Pas d'implication		---	---	Sols insensibles à l'eau

Famille F Sols organiques, sous-produits industriels	Pas d'implication sauf dans le cas des cendres volantes silico-alumineuses issues des centrales thermiques (F 2)		---	---	Sols sensibles à l'eau
F 2	Humide	4 - 10	---	---	
	Très humide	0 - 4	---	---	
Famille R Roches	Pas d'implication sauf dans le cas de roches argileuses fragmentables (R 34)		---	---	
R 3	Humide	2 - 5	---	---	
	Très humide	0 - 2	---	---	

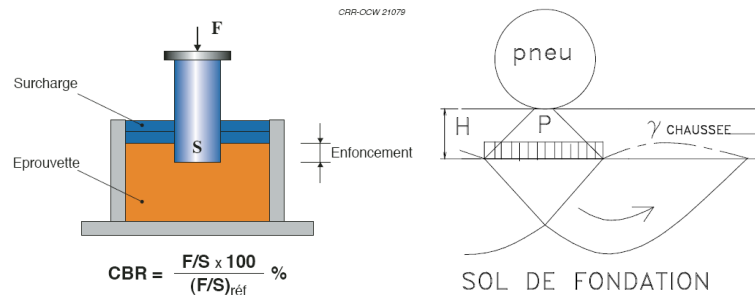
REMARQUE : Dans la colonne des valeurs d'IPI, les chiffres en caractères gras sont ceux dont le choix est à privilégier dans le calcul de dimensionnement.

b. Essais CBR ou California Bearing Ratio

L'essai CBR permet d'évaluer l'aptitude d'un sol situé sous la structure routière à supporter le trafic. Il est réalisé en plaçant une surcharge de 8 kg au-dessus de l'éprouvette afin d'empêcher tout mouvement des grains en surface (*empêche la formation de bourrelet*); ce qui représente assez bien le comportement d'un sol ou d'une sous-fondation située sous la structure. Les valeurs mesurées sont généralement plus importantes.

Trois types d'indice CBR (*exprimé en %*) existent :

- L'**indice CBR immédiat (CBR)** correspond au poinçonnement d'une éprouvette immédiatement après sa réalisation. La valeur minimale généralement admise pour un fond de coffre est de 20 %. Généralement, un sol présentant un CBR > 4 offre un taux de compactage > 95 % OPN ;
- L'**indice CBR après quelques jours (CBRxj)** est réalisé après plusieurs jours (3 ou 7 jours).
- L'**indice CBR après immersion dans l'eau (CBR_{4j} immersion)** correspond au poinçonnement d'une éprouvette après immersion de l'ensemble (*éprouvette + surcharge*) dans l'eau durant 4 jours à 20°C. Le gonflement total est ensuite mesuré dans l'eau ($G(\%) = (\Delta h/h) \times 100$) avant d'essorer le tout et de réaliser l'essai CBR. Ceci simule un sol humidifié après son compactage en place et permet de voir son comportement vis-à-vis de l'eau. Certains sols mal compactés peuvent avoir une bonne valeur d'IPI mais offrir une mauvaise portance à long terme.



$$CBR = \frac{F/S \times 100}{(F/S)_{réf}} \%$$

Figure 2.22 : Principe de l'essai CBR.

La variation du CBR avec la teneur en eau dépend du type de sol :

- Un **sol argileux** présente en général des valeurs faibles diminuant lentement avec l'augmentation de la teneur en eau ;
- Un **sol limoneux** peut présenter des valeurs élevées mais qui décroissent rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau ;
- Un **sol sableux** montre souvent des valeurs élevées peu sensibles à l'action de l'eau.

Pour garantir le maintien à long terme des performances de portance, le facteur CBR_{4j} d'immersion / IPI est mesuré et doit fournir une valeur supérieure ou égale à 1.

2.4.2 Compressibilité

La **compressibilité** se définit comme la *diminution de volume du sol en présence d'une charge au-dessus*. Ce paramètre est important à déterminer pour un sol devant recevoir un remblai ou une structure au-dessus de lui. Dans ce cas, il importe de déterminer le type de consolidation initiale du sol ainsi que l'épaisseur du tassement attendu après réalisation de l'ouvrage.

La valeur de compressibilité est généralement très faible pour un sol pulvérulent (*sable et gravier*) où les grains se touchent les uns aux autres. Ce sol est appelé **incompressible**. Par contre, un sol fin cohérent (*argile et limon*) peut se compresser avec le départ de l'eau et la disparition de certains phénomènes chimiques spécifiques aux argiles. Ce sol est dit **compressible** et doit faire l'objet d'une étude plus approfondie.

REMARQUE : Il existe une certaine corrélation entre la compressibilité d'un sol et son indice de plasticité (I_p). Plus la valeur I_p est élevée, plus la compressibilité est importante.

Dans le cas d'un sol fin saturé en phase de chargement, les contraintes de la charge uniforme appliquée commencent à se transmettre presque intégralement à l'eau interstitielle, vu les faibles valeurs de compressibilité de l'eau par rapport aux grains et à la structure du sol. Cela se traduit par un départ progressif de la phase liquide. Ainsi, à fur et à mesure que l'eau diminue et que le volume du sol diminue, la distribution des contraintes passe de la phase liquide à la phase solide. C'est alors le squelette granulaire d'un sol qui se déforme de façon non linéaire (*contact de Hertz*) sous forme de *tassement primaire* ou *consolidation hydrodynamique*. Lorsque les contraintes sont intégralement reportées sur le squelette solide ($u = 0$), le sol est dit *consolidé*.

REMARQUE : Plus le sol est imperméable, plus la mise en équilibre est lente.

Dans le cas d'un sol fin saturé (*vase et tourbe*), le tassement primaire est accompagné d'un *tassement secondaire* qui apparaît après la consolidation hydrodynamique et subit une loi linéaire en $\log t$. Ce phénomène est négligeable pour une argile et un limon.

2.4.2.1 Essai œdométrique

Cet essai représentatif de la compressibilité consiste à mesurer les variations de volume d'un échantillon contenu dans un cylindre entre 2 bandes poreuses (*expulsion de l'eau*) et soumis à un piston sur lequel s'exerce différents paliers de force (*croissante, constante ou décroissante*). Les valeurs sont reportées sur un graphe $\varepsilon - \log \sigma$ et permettent de déterminer la *pression de consolidation* (p_c).

Cette valeur p_c est comparée à la valeur γh correspondant à la charge normale d'un sol situé à la profondeur h . Trois situations existent.

Tableau 2.XXIII – Classification du sol sur base de sa pression de consolidation.

	Type de sol	Commentaire
$p_c = \gamma h$	Sol normalement consolidé	
$p_c > \gamma h$	Sol surconsolidé	Présence d'une charge plus importante dans l'histoire du sol
$p_c < \gamma h$	Sol sous-consolidé	Cas des remblais non suffisamment compacté

Cet essai permet également de mesurer la perméabilité après la mise en équilibre hydrodynamique du sol sous une charge p . Les variations de la perméabilité en fonction du serrage du sol peuvent ainsi être également déterminées pour autant que l'échantillon soit isotrope.

2.4.3 Cisaillement

Sous l'effet de sollicitations extérieures excessives, le sol subit des déformations plastiques et des glissements entre particules apparaissent. Ces déformations peuvent être évaluées par la *loi de Coulomb* (*condition d'équilibre limite de glissement*) : $\sigma_t = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$ avec σ_t et σ_n : *contraintes tangentielles* (t) et *normales* (n) appliquées à l'équilibre, c : *cohésion* (*comportement plastique des argiles*) et φ : *angle de frottement* (*contacts physiques entre les grains*).

La loi de Coulomb peut être déterminée par plusieurs essais différents qui fournissent une droite intrinsèque (*droite ou courbe de Coulomb*) sur le graphe $\sigma_n - \sigma_t$ appelé *plan de Mohr*. L'équation de cette droite correspond à la loi de Coulomb où le terme C correspond à l'intersection avec l'axe des ordonnées et le terme $\sigma_n \cdot \tan \varphi$ correspond à la pente.

Les essais les plus fréquemment utilisés sont :

- *L'essai à la boîte de Casagrande* est l'essai le plus courant. L'échantillon est enfermé dans deux demi-boîtes pouvant glisser l'une sur l'autre et soumis à une force normale au plan de glissement. L'effort maximal de cisaillement est mesuré en enregistrant la courbe effort – déformation. Le résultat de l'essai est le couple ($\sigma_{normal} - \sigma_{transversal}$) qui définit un point dans le plan de Mohr. La mesure de plusieurs couples ($\sigma_n - \sigma_t$) fournit une courbe intrinsèque du sol appelée *droite de Coulomb* ;
- *L'essai triaxial* : L'échantillon cylindrique gainé est soumis latéralement à la pression d'un fluide ($\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{lat}$) et axialement à la charge d'un piston ($\sigma_2 = \sigma_c$). La courbe effort axial – déformation axiale est mesurée jusqu'à la rupture qui fournit le couple ($\sigma_1 - \sigma_3$). Cet essai permet de déterminer le cercle

de Mohr de l'équilibre ultime. L'enveloppe des cercles de Mohr est la courbe intrinsèque ou droite de Coulomb (*sols*).

La courbe de Coulomb délimite ainsi le domaine de contraintes que le sol peut supporter sans céder (*partie sous la courbe*).

REMARQUE : La loi de Coulomb ne s'applique plus pour des contraintes élevées car des phénomènes d'attrition apparaissent, le phénomène devient plus complexe et la droite prend la forme d'une parabole. Ce phénomène intervient d'autant plus vite que le diamètre des grains est important. Ce phénomène apparaît pour les argiles à partir de 20 MPa.

Le comportement du sol et l'équation de Coulomb diffèrent selon la nature du sol.

2.4.3.1 Cas d'un sol pulvérulent

Dans un sol pulvérulent **sec**, la résistance au cisaillement est uniquement liée aux contacts et frottements entre grains, vu l'absence d'argile et les phénomènes d'adsorption y associés ($c = 0$). La loi de Coulomb se ramène à l'expression suivante : $\sigma_t = \sigma_n \cdot \text{tg } \varphi$ et la droite de Coulomb démarre de l'origine des axes.

Ainsi, la résistance au cisaillement d'un sable sec dépend uniquement de l'angle de frottement interne φ qui est fonction de la compacité du milieu, de la forme des grains et de la granulométrie.

La valeur de l'angle de frottement peut être déterminée de plusieurs façons :

- Les *essais en laboratoire* fournissent une valeur représentative de l'angle de frottement ;
- La *formule de Lungren* tient compte de ces paramètres pour estimer une valeur globale de φ pour un sol grossier : $\varphi = 36^\circ + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4$

Tableau 2.XXIV- Valeurs des paramètres de la formule de Lungren.

φ_1	COMPACTITE ou POROSITE	Etat lâche de compacité	- 6 °
		Etat moyen de compacité	0 °
		Etat dense de compacité	+ 6 °
φ_2	FORME DES GRAINS	Forme anguleuse	+ 1 °
		Forme subanguleuse	0 °
		Forme arrondie	- 3 °
		Forme roulée	- 6 °
φ_3	TAILLE DES GRAINS	Sable (50 μm < \varnothing < 2 mm)	0 °
		Gravillons (2 mm < \varnothing < 6 mm)	+ 1 °
		Graviers (\varnothing > 6 mm)	+ 2 °
φ_4	REPARTITION GRANULOMETRIQUE	Sol mal classé ($C_{\text{ugraviers}} < 4$ ou $C_{\text{usable}} < 6$)	- 3 °
		Sol intermédiaire ($C_{\text{ugraviers}} = 4$ ou $C_{\text{usable}} = 6$)	0 °
		Sol bien classé ($C_{\text{ugraviers}} > 4$ ou $C_{\text{usable}} > 6$)	+ 3 °

EXEMPLE : Un sable moyen bien classé et dense constitué de grains arrondis aura une valeur d'angle de frottement interne équivalente à $36^\circ + (+6^\circ) + (-3^\circ) + (0^\circ) + (+3^\circ) = 42^\circ$

- La corrélation *frottement interne - indice des vides e. $\text{tg } \varphi = C^{\text{te}}$* (Avec C^{te} : constante comprise entre 0,45 et 0,55 en fonction de la nature, de la taille et de la forme des grains) donne une estimation approximative de l'angle de frottement.

Toutefois, la valeur φ est influencée par d'autres paramètres :

- L'eau (jusqu'à une certaine teneur) joue non seulement un rôle de lubrifiant entre les éléments mais également un rôle de cohésion. En effet, une faible présence d'eau engendre des forces capillaires entre les grains dont la résultante est R. Cela se traduit par l'apparition d'une certaine cohésion appelée *cohésion capillaire* ou *cohésion équivalente*. La valeur de C n'est donc pas totalement nulle mais équivaut à $C_{\text{équivalente}} = \frac{\lambda \cdot \text{tg } \varphi}{R}$ ($\text{gr/cm}^2 = 0,1 \text{ kPa}$) ($\lambda \approx 0,3$ et R = rayon moyen des grains exprimé en cm)

REMARQUE : La cohésion capillaire permet notamment de construire un château de sable sans que celui-ci ne s'éboule. Pour un même matériau, la valeur de cohésion capillaire peut varier énormément.

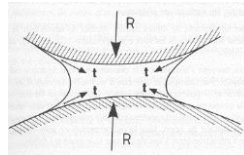


Figure 2.23 - Notion de cohésion capillaire.

- La **teneur en matière organique** : L'angle de frottement est inversement proportionnel à la teneur en matière organique.
- La **variation de volume en cours d'essai** pour un sable bien compacté se traduit sous forme d'un **foisonnement** (réorganisation initiale des grains qui se traduit sous forme d'une augmentation de volume) avant de se recompresser normalement ;
- Les **sollicitations cycliques** (par exemple, des vibrations) rendent le phénomène complexe et accélèrent le processus d'attrition ; d'où une réduction de la résistance au cisaillement. Dans le cas où le sol pulvérulent est saturé et que l'eau ne peut s'échapper, une partie de la contrainte résiduelle se reporte sur la phase liquide. La pression interstitielle (u) augmente donc progressivement. Une fois que cette valeur atteint la pression de confinement, les contraintes effectives ($\sigma_2 - u$ et $\sigma_3 - u$) s'annulent. Le sable ne présente plus aucune résistance et se déforme indéfiniment dans la direction de σ_1 . Il se liquéfie. Ce phénomène apparaît notamment en cas de tremblement de terre et provoque la rupture de conduite et l'effondrement d'ouvrage.

REMARQUE : Le phénomène de **liquéfaction** dépend de la densité du matériau (plus le matériau est dense, moins grande est l'influence de l'eau), de l'amplitude de la sollicitation cyclique, du nombre de cycles et de la contrainte effective moyenne (ce phénomène n'est plus observé à une profondeur supérieure à 20 m) mais pas de la fréquence.

2.4.3.2 Cas d'un sol cohérent

Pour un sol fin cohérent (argile et limon), la déformation plastique ($c \neq 0$) s'ajoute aux contacts physiques intergranulaires. La loi de Coulomb est complète : $\sigma_t = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$

Les valeurs C et φ peuvent être obtenues par les méthodes suivantes :

- Les **essais en laboratoire** fournissent des valeurs représentatives ;
- La **corrélation de Padfield et Mair** (1983) fournit une estimation de φ à partir de l'indice de plasticité.

Tableau 2.XXV - Corrélation de Padfield et Mair entre l'indice de plasticité et l'angle de résistance au cisaillement.

Indice de plasticité (Ip)	Angle de résistance au cisaillement (φ)
15	30
20	28
25	27
30	25
40	22
50	20

Toutefois, la loi de Coulomb peut être influencée par d'autres paramètres :

- **L'eau non drainée** : En réalité, la loi de Coulomb n'est valable que si la contrainte σ_n agit totalement sur les grains. Or, l'eau contenue dans le sol fin et qui ne peut s'échapper par drainage reprend une partie de la contrainte appliquée sous forme de **pression interstitielle** (u). Comme la résistance au cisaillement de l'eau est nulle, la loi de Coulomb devient la **loi d'Hvorslev** : $\sigma_c = C + (\sigma_n - u) \cdot \tan \varphi$

D'autre part, la pression interstitielle totale peut se décomposer : $u_{total} = u_{charge} + u_{cisaillement}$

En réalité, trois types d'essais triaxial peuvent être réalisés pour un sol fin selon la prise en compte de la pression interstitielle. Chaque essai fournit une droite de Coulomb distincte, notamment l'essai UU réalisé sur une argile saturée donne un angle de frottement interne apparent nul (droite horizontale).

- **L'essai consolidé - drainé ou essai CD** : Les différentes pressions interstitielles sont dissipées et les paramètres mesurés sont C' et φ' ;

- *L'essai consolidé – non drainé ou essai CU* : Seule, la pression interstitielle due au cisaillement ($u_{\text{cisaillement}}$) est dissipée et les paramètres mesurés sont C_{cu} et ϕ_{cu} . Cet essai est plus rapide d'exécution car il ne permet pas le drainage ;
- *L'essai non consolidé – non drainé ou essai UU* : Les différentes pressions interstitielles ne sont pas dissipées et les paramètres mesurés sont C_u et ϕ_u .

REMARQUE : Le quatrième essai, à savoir l'essai non consolidé – drainé (UD) n'est pas réalisé.

- Le *phénomène de succion* liée à l'eau capillaire donne lieu à une pression négative (pF) dans l'eau interstitielle (*contrainte effective de compression*). Son intensité est proportionnelle à la hauteur d'ascension capillaire dans le sol $pF = f(\log_{10} \text{Hauteur eau (cm)})$
 Cette pression est mesurée par des plaques de succion, des tensiomètres, par centrifugation ou par des mesures indirectes (*tension de vapeur*). La succion est fonction de la nature et de la granulométrie du sol ainsi que de la teneur en eau mais également de l'histoire de la teneur en eau. En effet, la succion sera différente si la base d'un sol sec est immergée dans l'eau (*phase d'humidification*) ou si l'échantillon s'assèche ;
- Les *sollicitations cycliques* jouent uniquement sur une légère modification des résistances au cisaillement et non sur le phénomène de liquéfaction (*sol pulvérulent*). Toutefois, pour une argile molle, le facteur le plus dégradant n'est pas la répétition mais l'alternance des sollicitations (*inversion des contraintes*). En effet, il faut généralement une centaine de cycles alternés pour diminuer de moitié la résistance des argiles. Cette diminution peut être réduite en appliquant une force statique en plus de la force cyclique mais il est difficile de séparer les effets liés à la fatigue de ceux liés à la viscosité puisque la charge statique est appliquée beaucoup plus lentement que la charge cyclique

REMARQUE : Certaines argiles hypersensibles en Scandinavie ("*quick clays*") peuvent subir un phénomène de liquéfaction d'origine autre. Cela est dû au lessivage des ions Na par l'eau douce tout en conservant leur structure ($R_c \cong 0,1 \text{ MPa}$). A la moindre sollicitation, elles se transforment en liquide. Pour éviter cela, il convient de les traiter aux sels.

2.4.4 Compression

Ce type de comportement ne concerne que le sol lié au liant et les sols cohérents, vu l'absence de cohésion dans un sol granulaire.

2.4.4.1 Compression uniaxiale

L'éprouvette allongée de sol est soumise à une force longitudinale en l'absence de contraintes latérales. La valeur de résistance à la compression (R_c) est alors déterminée.

La courbe contrainte (σ) – déformation (ε) est généralement plus ou moins incurvée avec le module de déformation qui diminue avec le déplacement. Dans certains cas, apparaît pour de faibles charges, une courbure inverse qui correspond au recompactage de l'éprouvette et à une mise en place des bases. Cela peut être corrigé en déplaçant l'origine des axes.

Le comportement du sol lors de la rupture dépend de l'état de compaction et de l'humidité de l'éprouvette et permet de distinguer 3 types de sols :

- Un *sol très raide* (*sol sec ou sol cimenté*) se casse par développement de fissures longitudinales et parallèles à la contrainte (*comportement similaire à la roche*) ;
- Un *sol raide* se rompt selon un plan de cisaillement transverse ;
- Un *sol plastique* se rompt selon une multitude de petits plans de cisaillement et se caractérise par une diminution de la hauteur de l'éprouvette et une augmentation du diamètre central. Il prend la forme d'un tonneau. De plus, si la charge est maintenue avant la rupture, l'échantillon poursuit sa déformation (= *fluage*).

Lors d'un cycle de déchargement – rechargement, la boucle d'hystérésis est relativement étroite et les modules mesurés sont nettement supérieurs au module du matériau vierge.

Cet essai permet également de déterminer la *sensibilité du sol* (S_t), soit la *perte de consistance et donc de résistance à la compression simple suite à un remaniement* (*réorientation des particules et modification des forces de liaison*).

$$S_t = R_c \text{ non remanié} / R_c \text{ remanié}$$

La classification reprise dans le tableau ci-dessous peut être réalisée.

Tableau 2.XXVI - Classement des sols selon leur sensibilité S_t .

S_t	Etat de sensibilité du sol
< 2	Non sensible
2 - 4	Peu sensible
4 - 8	Sensible
8 - 16	Très sensible
16 - 32	Légèrement instable
32 - 64	Instable
> 64	Très instable

REMARQUE : Les "quick clays" scandinaves (voir ci-dessus) peuvent être considérées comme un sol très instable bien qu'il ne soit pas possible de réaliser des éprouvettes sur de tels sols.

Après une période de repos, à teneur en eau constante, une fraction de la résistance perdue est récupérée. C'est le phénomène de *thixotropie*.

2.4.5 Traction

Cet essai n'est appliqué que dans certains cas particulier (*sol traité*) en raison de l'absence de cohésion dans un sol classique.

2.5 ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Certains sols peuvent contenir des éléments polluants d'origine naturelle ou anthropique dont il importe de déterminer le comportement vis-à-vis du milieu dans lequel le sol est destiné (*milieu aqueux, acide, ...*).

Cependant, comme il existe une grande diversité de polluants, il est quasi impossible de tous les analyser. Chaque pays ou région dispose d'une liste de contaminants à déterminer dans tous les cas de figure (*paquet standard*). D'autres polluants peuvent être ajoutés s'ils sont susceptibles d'être présents dans la zone étudiée. Ainsi, le sol d'une ancienne entreprise fait l'objet d'une analyse plus poussée en fonction de l'histoire de l'entreprise.

Les éléments polluants les plus fréquemment analysés sont les métaux lourds et métalloïdes, les huiles minérales, les solvants chlorés (*y compris le chlorure de vinyl*) et les hydrocarbures aromatiques (*monocycliques et polycycliques HAP*).

Cette analyse comporte plusieurs types d'essais :

- La *composition chimique du sol* est déterminée par des appareils sophistiquées comme la diffractométrie par rayons X, l'analyse spectrale ou des méthodes chimiques ;
- Le *comportement des éléments vis-à-vis de l'eau* est étudiée par des méthodes de lixiviation (*avec ou sans broyage du sol*) et de percolation.

3. CLASSIFICATIONS

En réalité, *il n'existe pas une seule et unique classification géotechnique* qui puisse convenir pour toutes les applications du génie civil. Chaque pays et domaine d'application a pratiquement sa propre classification. Le présent chapitre reprend en détail les classifications belge et française (GTR) et décrit brièvement d'autres classifications fréquemment utilisés en Europe et en Amérique du Nord.

Toute classification des sols doit pouvoir répondre à deux objectifs bien distincts :

- *Pouvoir ranger les sols par catégorie* présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou du moins des caractéristiques proches. Il y a donc lieu d'avoir un nombre restreint de catégories au sein de la classification ;
- *Fournir une indication claire précise et concise sur le comportement attendu du sol* vis-à-vis de certaines contraintes.

Toutefois, la majorité des classifications se base sur des paramètres communs tels que la granulométrie, les limites d'Atterberg, etc.

Certains pays font intervenir des caractéristiques supplémentaires. Les allemands ont associé leur classification à une appréciation sur la gélimité (ZTVE-StB 59). Les américains donnent pour chaque type de sol de la classification, une appréciation de la valeur pour une application en fondation et sous-fondation, la sensibilité au gel, ses caractéristiques drainantes, ses possibilités de tassement et de gonflement, la fourchette moyenne des densités sèches, CBR, et des modules des réactions atteintes sur le chantier (*tableau II-2 du Soil Manual*).

Une classification géotechnique est souvent accompagnée d'informations géologiques car il s'agit de deux données différentes complémentaires. Ainsi, deux sols de même nature géologique peuvent se comporter géotechniquement de plusieurs manières et vice versa, plusieurs sols aux comportements géotechniques similaires peuvent être de nature différente. La classification géologique permet également de prévoir certains comportements géotechniques mais cela n'est pas suffisant.

3.1 CLASSIFICATIONS GRANULOMETRIQUES

Il existe une très grande diversité de classifications basées uniquement sur la granulométrie. La majorité d'entre elles, distingue les mêmes classes de matériaux : argile, limon ou silt, sable fin, sable grossier, gravier et gravillon, galets et bloc avec des limites variables d'une classe à l'autre. C'est pourquoi il faut toujours préciser le nom de la classification utilisée.

Dans bon nombre de cas, le sol recouvre plusieurs classes. Le sol est alors dénommé par sa classe prépondérante, qualifié d'un caractère secondaire.

Le présent chapitre reprend une liste non exhaustive de classifications.

3.1.1 Classification simpliste

Cette classification très simple distingue deux catégories selon la présence de particules argileuses aux comportements chimiques spécifiques ou pas :

- Le *sol fin* ou *sol cohérent* se définit comme un *sol contenant une certaine teneur en argile et donc caractérisé par des phénomènes de cohésion*. Il regroupe les sols argileux et limoneux ;
- Le *sol grossier* ou *sol pulvérulent* se définit comme un *sol contenant majoritairement des grains inertes chimiquement*. Il regroupe le sable, les graviers et les cailloux.

3.1.2 Diagramme de Taylor (1956) ou classification française (sols fins)

Le *diagramme de Taylor* ne concerne en réalité que les *sols fins*, soit des sols dont le diamètre des grains ne dépasse pas 2 mm. Le sable grossier et gravier ne sont pas pris en compte. Elle distingue 3 catégories : L'argile ($\emptyset < 5 \mu\text{m}$), le silt ($5 \mu\text{m} < \emptyset < 50 \mu\text{m}$) et le sable ($\emptyset > 50 \mu\text{m}$) ;

REMARQUE : Dans cette classification, le limon se définit comme un mélange de silt et de sable.

La *classification française* s'est inspirée du diagramme de Taylor.

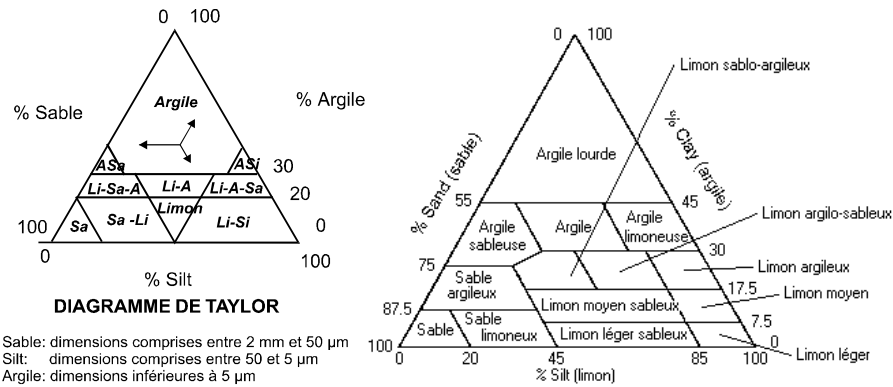


Figure 3.1 - Classification française basée sur le diagramme de Taylor.

3.1.3 Autres classifications granulométriques

- La *classification de A. Caillieux* ;
- La *classification de Wentworth CK* ;
- La *classification ABEM* (Association Belge pour l'Etude, l'Essai et l'Emploi des Matériaux) ;
- La *classification BS* (British Standards Institution - Grande-Bretagne) ;
- La *classification ASTM* (American Society for Testing and Materials - U.S.A) ;
- La *classification MIT* (Massachusetts Institute of Technology).

Tableau 3.I- Synthèse des classifications courantes basées sur la granulométrie seule.

NOMENCLATURE	A. CAILLIEUX	C.K. WENTWORTH	Procédure
Argile	$\varnothing < 2 \mu\text{m}$	$\varnothing < 3,9 \mu\text{m}$	centrifugation
Silt ou limon	$2\mu\text{m} < \varnothing < 20 \mu\text{m}$	$3,9 \mu\text{m} < \varnothing < 62,5 \mu\text{m}$	sédimentation
Sable fin	$20 \mu\text{m} < \varnothing < 200 \mu\text{m}$	$62,5 \mu\text{m} < \varnothing < 2\text{mm}$	décantation, élutriation + tamisage
Sable grossier	$200\mu\text{m} < \varnothing < 2\text{mm}$		tamisage
Gravier et gravillon	$2\text{mm} < \varnothing < 20\text{mm}$	$2 \text{ mm} < \varnothing < 64 \text{ mm}$	tamisage
Cailloux	$20\text{mm} < \varnothing < 200 \text{ mm}$	$64 \text{ mm} < \varnothing < 256 \text{ mm}$	tamisage
Blocs	$200 \text{ mm} < \varnothing$	$256 \text{ mm} < \varnothing$	

	0,002	0,006	0,02	0,063	0,074	0,2	0,42	0,6	2	4,76	6	19	20	60	76	305	
A.B.E.M CRR	Argile I	Limon II II a II b			Sable fin III	Sable moyen et grossier IV IVa IVb		Gravier V Va Vb Vc			Cailloux, galet et pierre VI						
B. S (British Standards)	Argile	Limon (silt) fin moyen gros			Sable fin moyen gros			Gravier fin moyen gros			Cailloux						
A.S.T.M (American Society)	C Argile	Fines M Limon			Sable fin moyen gros			Gravier fin gros			Cailloux	Enrochement					

SEUILS GRANULOMETRIQUES POUR DIVERS PAYS		60	20,0	6,0	2,0	0,6	0,4	0,2	0,06	0,02	0,006	0,002
Atterberg (1905) Nomencl. Routière	Cailloux		Graviers		Sables gros fins				Limons		Argiles	
British Standard System	Cailloux		Graviers		Sables gros moyens fins				Limons gros moyens fins		Argiles	
Sté Autrichienne de recherches routières	Cailloux		Graviers		Sables gros fins				Limons		Argiles	
Massachus. Instit. of Technology	Cailloux		Graviers		Sables				Limons		Argiles	
Sté Allemande de Rech. Rout. ; DIN 4022	Cailloux		Graviers gros moyens fins		Sables gros moyens fins				Limons		Argiles	
Suisse Norme S.N.V.	Cailloux		Graviers		Sables				Limons		Argiles	
C.R.R. Bruxelles Belgique	Cailloux Fraction (VI)		Graviers (v)		Sables gros (IV) fins (III)				Limons (II)		Argiles (I)	
A.S.T.M.	Cailloux		Graviers gros fins		Sables gros fins				Limons		Argiles	
U.S.C.S. Corps of engineers	Cailloux		Graviers gros fins		Sables gros moyens fins				Limons et (ou) Argiles			
A.A.S.H.O.	Cailloux		Graviers gros moyens fins		Sables gros moyens fins				Limons		Argiles	
Civils Aeronautics Administration (U.S.Q.)			Graviers		Sables gros fins				Limons		Argiles	
		76,2	25,4 19,1	9,52 4,76	2,0	0,42 0,25	0,074 0,05			0,005		

3.2 CLASSIFICATIONS BASEES UNIQUEMENT SUR LA PLASTICITE

3.2.1 Diagramme de Casagrande (1947)

Cette classification ne concerne que les sols fins cohérents et les sols organiques puisqu'elle ne tient compte que des critères limite de liquidité (W_L) et indice de plasticité (I_p) du sol pour le positionner dans le graphe ci-dessous. Ce diagramme est utilisée dans de nombreuses autres classifications géotechniques plus complètes des sols (*voir plus loin*).

La partie supérieure du graphe concerne les argiles inorganiques alors que la partie inférieure concerne les sols organiques, les limons étant situés dans la partie moyenne. La ligne A permet de séparer les argiles inorganiques des autres sols fins. Les sols pulvérulents (*sable et graviers*) ne sont pas réellement considérés. Ils se situent tous en réalité à proximité de l'origine des axes.

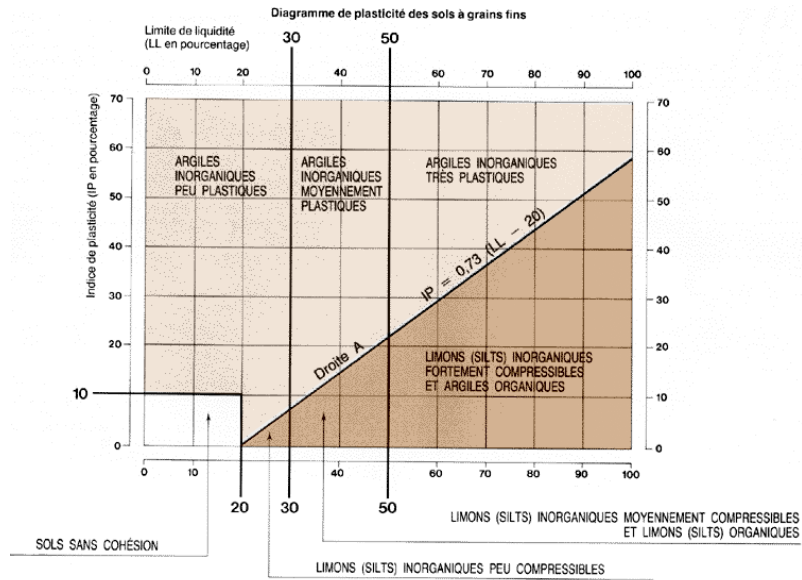
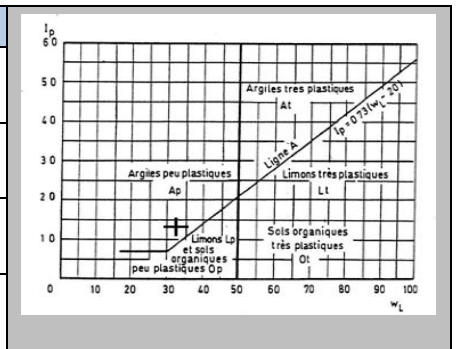


Figure 3.2 : Classification de Casagrande (source : fao.org).

Selon la position du sol au sein du diagramme de Casagrande, un sol non organique est désigné par l'un des symboles ci-après.

Tableau 3.II - Désignation française des sols selon le diagramme de Casagrande.

Désignation	Symbole international	Symbole français
Limon peu plastique	ML	Lp
Limon très plastique	MH	Lt
Argile peu plastique	CL	Ap
Argile très plastique	CH	At



REMARQUE : Cette classification ne tient pas compte de la composition minéralogique des argiles qui influence également le comportement du sol.

3.3 CLASSIFICATIONS GEOTECHNIQUES (granulométrie et plasticité)

Dans le cas d'un sol fin (*argileux*), la granulométrie ne suffit pas. Il faut y ajouter un critère de plasticité tel que l'indice de plasticité (I_p). Ainsi, un sol fin argileux a un comportement différent de celui d'un sol fin constitué majoritairement de grains de quartz.

Les principales classifications sont :

- La *classification belge* (voir ci-dessous) ;
- La *classification française GTR* (voir ci-dessous).

Ces classifications ont leurs limites. Un sol contenant un faible pourcentage de matière humique tend à augmenter les limites de liquidité et de plasticité. La présence de la chaux peut avoir un effet inverse. Une faible proportion d'argile gonflante dans un matériau sableux suffit à augmenter énormément l'indice de plasticité. Pour les tourbes et les calcaires, ces classifications ne sont pas suffisantes.

3.3.1 Classification belge (version wallonne - CCT QUALIROUTES 2020)

Cette classification s'applique aux sols meubles, soit les terrains meubles et les sols contenant moins de 20% d'éléments rocheux (roches friables ou délitées) de diamètre supérieur à 20 cm. Elle se base sur la classification ABEM.

Tableau 3.III - Classification belge des sols telle que décrite dans le CCT QUALIROUTES (Source : SPW)

0,002	0,02	0,063	0,2	2 mm	20	
Argile I	Limon II II a II b		Sable fin III	Sable grossier IV	Gravier V	Cailloux VI

Dénomination	Indice de plasticité (Ip)	Granularité
I. Sols fins		I + II > 10 %
I.1 Gravier et...I.3 (à recalculer avec I + II + III + IV = 100%)		V + VI > 50 %
I.2... I.3... graveleux (à recalculer avec I + II + III + IV = 100%)		15 % < V + VI ≤ 50 %
I.3		V + VI < 15 %
Argile	Ip > 25	III + IV ≤ 15 %
Argile sableuse	Ip > 25 15 < Ip < 25	III + IV > 15 % III + IV > 50 %
Limon	5 < Ip ≤ 25	II > 50 % et III + IV ≤ 15 %
Limon sableux	5 < Ip ≤ 25	II > 50 % et III + IV > 15 %
Limon peu plastique	Ip ≤ 5	II > 50 % et III + IV ≤ 15 %
Limon peu plastique sableux	Ip ≤ 5	II > 50 % et III + IV > 15 %
Sable argileux	5 < Ip ≤ 15	III + IV > 50 % et I ≥ IIa
Sable limoneux	5 < Ip ≤ 15	III + IV > 50 % et I < IIa
Sable peu argileux	Ip ≤ 5	III + IV > 50 % et I ≥ IIa
Sable peu limoneux	Ip ≤ 5	III + IV > 50 % et I < IIa
II. Sols grossiers		I + II < 10 %
Sable		V + VI ≤ 15 %
Sable graveleux		15 % < V + VI ≤ 50 %
Gravier sableux		V + VI > 50 % et III + IV > 15 %
Gravier		V + VI > 50 % et III + IV ≤ 15 %

En réalité, il n'existe plus de classification belge à proprement parlé mais bien des classifications régionales qui ont adapté certains paramètres afin d'être mieux interprétable.

Tableau 3.IV - Classification des sols meubles selon le CCT QUALIROUTES (édition 2020). En noir, prescriptions du CCT QUALIROUTES. En rouge, différences du SB 250. En vert, différences du CCT 2015 (Bruxelles)

0,002	0,02	0,063	0,2	2 mm	20	100
Argile I	Limon II II a II b		Sable fin III	Sable grossier IV	Gravier V	Cailloux VI VI a : 20 – 80 mm (SB 250)

Dénomination	SB 250	CCT 2015	Indice de plasticité (Ip)	Granularité
III. Sols fins				I + II > 10 %
I.1 Gravier et...I.3 (à recalculer avec I + II + III + IV = 100%)	Non	Oui		V + VI > 50 % (V ≥ 50 %)
I.2... I.3... graveleux (à recalculer avec I + II + III + IV = 100%)	Non	Non		15 % < V + VI ≤ 50 %
I.3				V + VI < 15 %
Argile	Oui	Oui	Ip > (≥) (≥) 25 Ip > 25	III + IV ≤ 15 % III + IV > 15 %
Argile limoneuse			5 ≤ Ip ≤ 25	II < 50 % et III + IV + V < 50 %
Argile sableuse	Oui	Oui	15 ≤ Ip < 25	II < 50 % et III + IV + V < 50 %
			15 < (≤) Ip < 25	III + IV + V > 50 %
Limons			5 < Ip ≤ 25 15 ≤ Ip ≤ 25	II > 50 % et III + IV ≤ 15 % II ≥ 50 %
			5 ≤ Ip ≤ 15	III + IV + V < 50 %
Limons sableux	Non	Non	5 < Ip < 25	II ≥ 50 % et III + IV ≤ 15 %
Limons peu plastiques	Non	Non	Ip ≤ 5	II > 50 % et III + IV > 15 %
Limons peu plastiques sableux	Non	Non	Ip ≤ 5	II > 50 % et III + IV > 15 %
Sables argileux	Oui	Oui	5 < (≤) (≤) Ip ≤ 15	III + IV (+ V) (+ V) > (≥) (≥) 50 % et I ≥ IIa
Sables limoneux	Oui	Oui	5 < (≤) (≤) Ip ≤ 15	III + IV (+ V) (+ V) > (≥) (≥) 50 % et I < IIa
Sables peu argileux	Oui	Oui	Ip ≤ 5 (<)	III + IV > 50 % et I ≥ IIa (Bxl : seul I et IIa)
Sables peu limoneux	Oui	Oui	Ip ≤ 5 (<)	III + IV > 50 % et I < IIa (Bxl : seul I et IIa)
IV. Sols grossiers				I + II < 10 %
Sables	Non	Non		V + VI ≤ 15 %
Sables graveleux	Non	Non		15 % < V + VI ≤ 50 %
Graviers sableux	Non	Non		V + VI > 50 % et III + IV > 15 %
Graviers	Non	Non		V + VI > 50 % et III + IV ≤ 15 % VI ≥ 50 %
Sol finement sableux		Oui	Non plastique	III ≥ 50 %
Sol moyennement sableux		Oui	Non plastique	III + IV ≥ 50 % avec III < 50 % et IV < 50 %
Sol grossièrement sableux		Oui	Non plastique	III + IV ≥ 50 % et IV < 50 %
Sol finement graveleux			Non plastique	IV ≥ 50 %
Sol moyennement graveleux			Non plastique	V ≥ 50 %
Sol grossièrement graveleux			Non plastique	VI a ≥ 50 %
			Non plastique	VI ≥ 50 % et VI a < 50 %

Le CCT QUALIROUTES distingue 2 autres types de sols qui déterminent le mode de terrassement :

- Le **sol rocheux** contient, après désagrégation préalable, plus de 20 % d'éléments rocheux (dureté supérieure à celle de l'ongle dans l'échelle de Mohs) homogènes supérieurs à 20 cm et se caractérise par une vitesse sismique supérieure à 800 m/s (hors nappe aquifère). Son terrassement requiert une opération de rippabilité préalable ;
- Le **sol compact** contient plus de 40% d'éléments rocheux homogènes supérieurs à 50 cm après désagrégation à l'aide d'un marteau piqueur, explosif, fraise, mortier expansif ou tout autre moyen spécifique adapté. La limite inférieure de la vitesse sismique du sol compact (hors nappe aquifère) est

fixée conventionnellement à 1700 m/s. Son terrassement requiert des techniques particulières associées à celles de la roche (*explosif, fraise, marteau-piqueur, ...*).

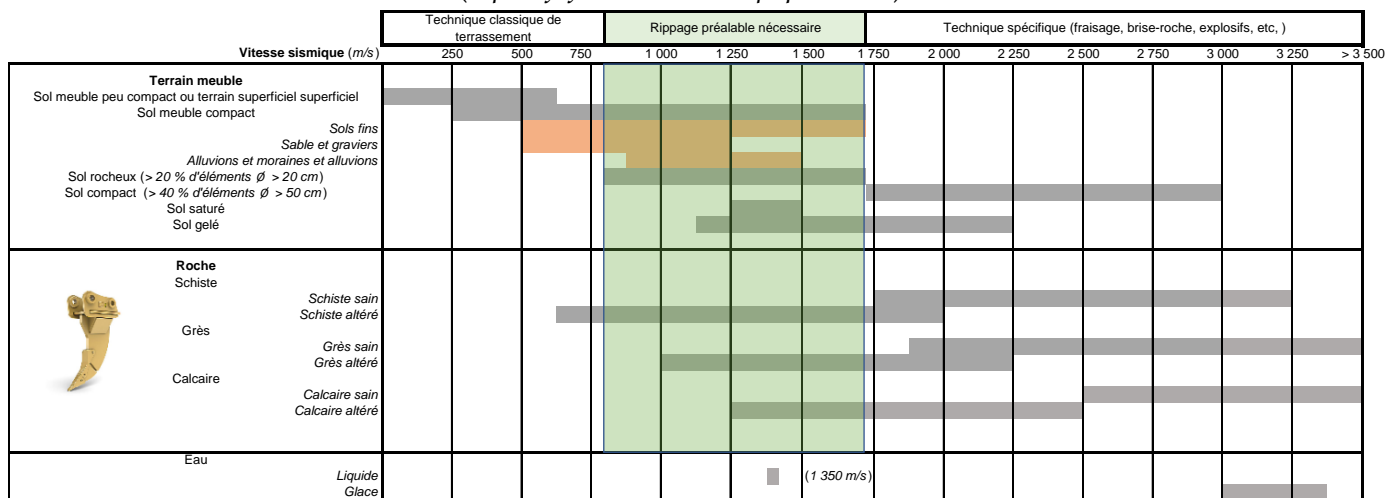


Figure 3.3 : Domaines des vitesses sismiques des principaux terrains meubles et roches sédimentaires et domaine de rippabilité avec un dent (cadre vert) (Source : JB Conseils et Caterpillar).

3.3.2 Classification française GTR

Cette classification normalisée (NF P11-300) issue du Guide Technique pour les terrassements routiers (GTR), s'applique à tous les matériaux (*naturels et secondaires*) utilisés en technique routière. Elle distingue trois grandes familles de matériaux au sein duquel sont présentes différentes classes et sous classes.

- Le **sol** comprend les classes A, B, C et D ;
- Le **matériaux rocheux** comprend la classe R. Une attention particulière doit être faite aux matériaux évolutifs tels la craie et le schiste qui nécessitent des essais particuliers (*masse spécifique, friabilité...*) ;
- Le **sol organique** (>3% matière organique) et les **sous-produits de l'industrie** sont repris en classe F.
- Les **matériaux élaborés** reprennent les granulats ;

Pour chaque sous-classe, elle préconise le type de traitement adéquat ainsi que les critères de compactage les plus adaptés. C'est la raison pour laquelle cette classification est régulièrement utilisée en Belgique, notamment dans le domaine ferroviaire (TGV) où elle sert de guide.

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50$ mm et passant à $80 \mu\text{m} > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou lp
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50$ mm et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou lp et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50$ mm et passant à $80 \mu\text{m} > 12\%$ ou passant à $80 \mu\text{m} \leq 12\% + \text{VBS} > 0,1$	30 sous-classes selon VBS, lp et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	$\text{VBS} \leq 0,1$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	

D_{max} = diamètre pour lequel 95 % des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments).

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
A_i (états th, h, m)				
A_ith	Sols normalement inutilisables en l'état La réduction de teneur en eau par une mise en dépôt provisoire ou drainage préalable (plusieurs mois) peut être envisageable après étude spécifique et permettrait de les ramener en A _i h.			NON
A_ih	Ces sols sont difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. Ils sont sujets au maïllesage. Le maïllesage est à éviter au niveau de l'arrosage-terrassement.	+ pluie faible = ni pluie, ni évaporation importante - évaporation importante	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes. Solution 1 : traitement T : traitement avec un réactif adapté C : compactage moyen Solution 1 : utilisation en l'état H : remblai de hauteur faible (≤ 5m) Solution 2 : sération E : extraction en couches minces W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10m) Solution 3 : traitement T : traitement avec un réactif adapté C : compactage moyen	0 0 0 1 0 2 0 0 0 0 0 0 3 1 1 0 1 0 1 2 2 0 0 0 1 0 2 0
A_im	Ces sols s'émouvent facilement mais sont très sensibles aux conditions météorologiques qui peuvent très rapidement interrompre le chantier à cause d'un excès de teneur en eau ou au contraire conduire à un matériau sec difficile à compacter.	++ pluie forte + pluie faible = ni pluie, ni évaporation importante - évaporation importante	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes. E : extraction frontale C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10m) C : compactage moyen Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel pour maintien de l'état C : compactage moyen Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10m) Solution 3 : extraction frontale E : extraction frontale C : compactage moyen	NON 2 0 0 0 0 2 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 3 0 0 2 0 0 0 0 0 0 1 2 2 0 0 0 0 2 0

Figure 3.4 – Classification GTR et exemple de conditions d'utilisation des matériaux en remblai (Source : Setra).

3.3.2.1 Sols (classes A, B, C et D)

Les sols sont caractérisés selon 3 familles de paramètres :

- Les **paramètres de nature** se rapportent à des paramètres intrinsèques (*paramètres variant peu ou pas dans le temps et au cours des manipulations*) telles que la granularité et l'argilosité ;

- Les *paramètres d'état* concernent l'environnement du sol et en particulier, l'état hydrique et la compacité ;
- Les *paramètres de comportement mécanique* tels que la fragmentabilité des éléments grossiers et l'abrasivité de la fraction grenue ($> 80 \mu\text{m}$).

REMARQUE : L'identification des sols est toujours principalement déterminée à partir de la fraction 0/50 mm.

La classification GTR définit les 4 classes suivantes :

- **Classe A - Sols fins** regroupe les sables fins (A1), les limons et silts (A1-A3), les argiles (A3 et A4) ainsi que les marnes et le loëss ;
- **Classe B - Sols sableux et graveleux avec fines** regroupe les sables pauvres en argiles et silt (B1, B2, B5 et B6) et les graves (B3 - B6) ;
- **Classe C - Sols comportant des fines et des gros éléments** (en quantité non négligeable) regroupe les sols fins avec de nombreux silex, les éboulis, les alluvions. Ils sont subdivisés sur base de la forme géométrique des particules grossières et sont caractérisés par une notation à deux lettres car les deux composants jouent un rôle non négligeable. Dans certains cas, la valeur D_{max} peut être indiquée en exposant. (Ex : C1₁₅₀B4h est un sol de classe C1 dont D_{max} est de 150 mm et la fraction 0/50, un sol de la classe B4h) ;
- **Classe D - Sols insensibles à l'eau** regroupe les sables purs (D1, D2) et les graves purs (D2, D3).

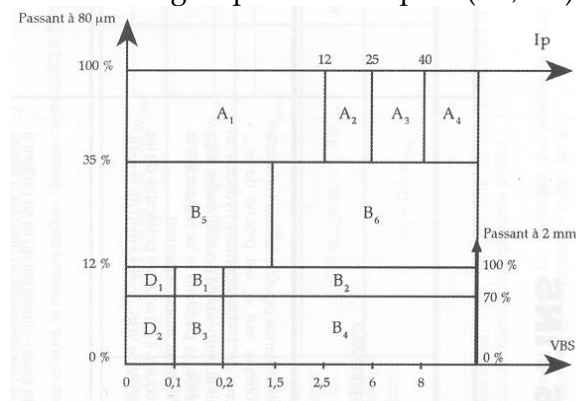


Figure 3.5 - Tableau synoptique des sols selon la classification GTR (extrait de la norme NF P11-300).

Tableau 3.V - Subdivision de la classe C dans la classification GTR.

Sous Classe	Forme des grains + % en fraction grossière	Caractéristique
C ₁	Éléments roulés : Tous les cas de figure Éléments anguleux : Moins de 40 %	Comportement similaire à celui des fines
C ₂	Éléments anguleux : Plus de 40 %	Comportement différent des fines

3.3.2.2 Matériaux rocheux (classe R)

Cette classification se base sur la nature géologique du matériau et son comportement à l'extraction ou au terrassement (*extraction, chargement, régilage, compactage sous le passage d'engins lourds et sous la pluie*), à l'action des contraintes mécaniques et de l'eau et à leur évolution dans le temps (*schiste et craie*).

Tableau 3.VI - Classification GTR des matériaux rocheux.

Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆

Le comportement du matériau dépend des opérations du terrassement (*extraction, chargement, régilage, compactage sous le passage d'engins lourds et sous la pluie*) et de l'action des contraintes mécaniques, de l'eau ou du gel (*risque d'évolution*) et de son évolution dans le temps. Il importe pour le géotechnicien de connaître ces différents points. Dans certains cas, un test d'abrasivité accompagné d'une analyse pétrographique de la roche permet de déterminer le taux d'usure des outils de malaxage.

3.3.2.3 Sols organiques et sous-produits industriels (classe F)

Cette catégorie concerne une multitude de matériaux particuliers dont la réutilisation en terrassement peut se révéler intéressante du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. La classification propose 9 familles caractérisées par des paramètres spécifiques. Au sein de ces familles, des valeurs seuils peuvent être retenus sur base d'une certaine expérience.

Tableau 3.VII - Classification GTR concernant les sols organiques et les sous-produits industriels.

Famille de matériaux	Symbole	Paramètre(s) considéré(s) comme significatif(s) vis-à-vis du réemploi
Matériaux naturels renfermant des matières organiques	F ₁	Teneur en matières organiques puis examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Cendres volantes silico-alumineuses	F ₂	Rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau optimum Proctor normal et valeur de l'IPI à la teneur en eau naturelle.
Schistes houillers	F ₃	Taux de combustion et examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B, C, D ou aux matériaux rocheux.
Schistes des mines de potasse	F ₄	Teneur en NaCl et pour ceux à faible teneur, examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Phosphogypse	F ₅	Mode d'obtention comportant ou non une neutralisation à la chaux, examen de la granulométrie et de la teneur en eau.
Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères	F ₆	Taux d'imbrulés et d'éléments solubles, qualité du déferrailage, du criblage et de l'homogénéisation, durée du stockage, présence ou non de cendres volantes de combustion.
Matériaux de démolition	F ₇	Qualité du déferrailage et de l'homogénéisation, présence d'éléments indésirables (plâtres, bois...), granulométrie.
Laitiers de hauts fournaux	F ₈	Caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols B, C, D, ou aux matériaux rocheux.
Autres sous-produits industriels	F ₉	Paramètres à définir à l'appui d'une étude spécifique.

3.3.2.4 Matériaux élaborés (granulats)

Cette classification établit également une classification sur base du niveau de difficulté de compactage pour les matériaux élaborés, voire certains sols grossiers. Trois classes sont ainsi présentes :

- Le **matériau DC1** a un faible indice de concassage. Les grains se mettent facilement en place pour un niveau d'énergie donnée. Les grains sont généralement arrondis.
- Le **matériau DC2** a un indice de concassage moyen. Leur mise en place est un peu plus difficile pour un niveau d'énergie donnée. Les grains sont majoritairement sub-arrondis à subanguleux.
- Le **matériau DC3** a un indice de concassage élevé. Leur mise en place est relativement difficile. Les grains sont majoritairement anguleux. Cependant, une fois mis en place, ils présentent de meilleures résistances mécaniques que les précédents matériaux.



Figure 3.6 : Classification GTR sur base du niveau de difficulté des sols (Source : Sol-Solution).

3.3.3 Autres classifications géotechniques

3.3.3.1 Classification européenne (ISO 14688-1 : 2002)

La classification établit les principes fondamentaux de dénomination et de classification des sols, sur base de critères faciles à utiliser sur site en se référant à d'autres essais plus précis et en tenant compte des adaptations à faire selon le type d'application. Elle s'adresse aux sols meubles naturels et artificiels.

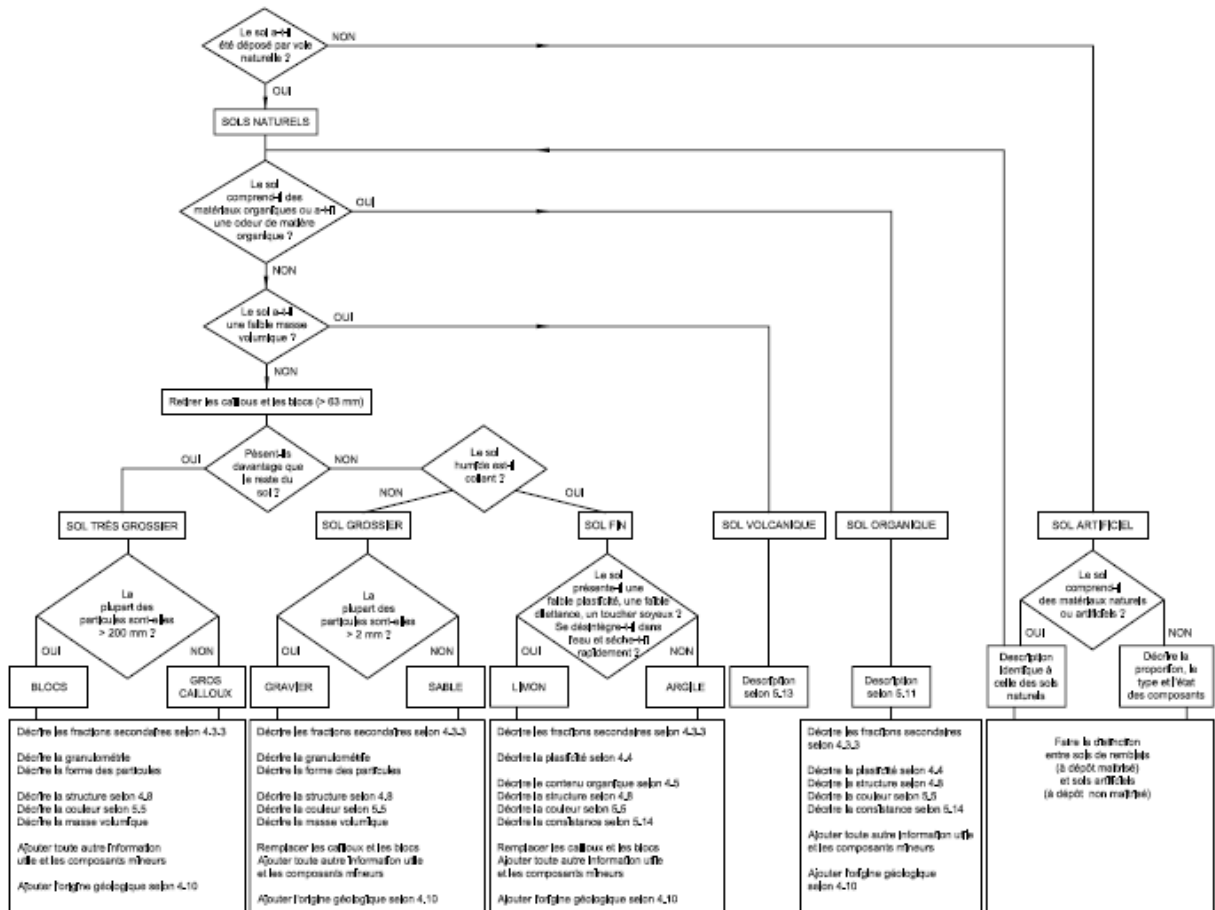


Figure 3.7 - Diagramme pour la dénomination et la classification des sols.

La granularité constitue la base fondamentale. Pour un sol homogène, le symbole utilisé correspond à la classe granulométrique du tableau ci-dessous. Or, la majorité des sols sont des composites constitués d'une fraction granulaire principale qui ont un rôle important dans les propriétés géotechniques du sol (*terme principal en majuscule*) et de fractions granulaires secondaires influentes (*adjectif qualificatif écrit en minuscules dans l'ordre inverse de leur importance*). Par exemple, le terme "fgrcsa Si" correspond à un limon sableux grossier avec graviers fins.

Tableau 3.VIII - Fractions massiques granulaires (selon la norme ISO 14688-1 : 2002).

Fractions granulaires	Subdivisions	Symboles	Taille des particules mm
Sol très grossier	Gros blocs	LBo	> 630
	Blocs	Bo	> 200 à 630
	Cailloux	Co	> 63 à 200
Sol grossier	Grave	Gr	> 2,0 à 63
	Graviers grossiers	CGr	> 20 à 63
	Graviers moyens	MGr	> 6,3 à 20
	Graviers fins	FGr	> 2,0 à 6,3
	Sable	Sa	> 0,063 à 2,0
	Sable grossier	CSa	> 0,63 à 2,0
	Sable moyen	MSa	> 0,2 à 0,63
	Sable fin	FSa	> 0,063 à 0,2
Sol fin	Limon	Si	> 0,002 à 0,063
	Limon grossier	CSi	> 0,02 à 0,063
	Limon moyen	MSi	> 0,0063 à 0,02
	Limon fin	FSi	> 0,002 à 0,0063
	Argiles	Cl	≤ 0,002

D'autres paramètres interviennent dans la classification, tels que la plasticité (*la formation de rouleaux de 3 mm de diamètre distingue la plasticité faible de la plasticité élevée*), la teneur en matière organique (*intensité de l'odeur et couleur*), l'origine et la consistance du sol ainsi que la forme des particules. Des classifications particulières existent pour les sols organiques et les sols volcaniques.

Tableau 3.IX - Dénomination et description des sols organiques.

Terme	Description
Tourbe fibreuse	Structure fibreuse, structure de plantes facilement reconnaissable, conservant une certaine résistance
Tourbe pseudo-fibreuse	Structure de plantes reconnaissable, sans résistance
Tourbe amorphe	Aucune structure de plantes visible, consistance pâteuse
Tourbe vaseuse	Restes de plantes ou d'animaux décomposés, présence possible de constituants inorganiques
Humus	Restes de plantes, organismes vivants et leurs excréments avec des constituants inorganiques, formant le terreau naturel

Tableau 3.X - Dénomination et description des sols volcaniques.

Terme		Dimensions des particules mm	Description
Cailloux volcaniques		> 63	—
Lapilli	—	> 2,0 < 63	—
	Ponce		Les particules sont vacuolaires et blanches.
	Scories		Les particules sont vacuolaires et noires.
Cendres volcaniques	Sable volcanique	≤ 2,0	Le sol présente des caractéristiques géotechniques particulières dans chaque zone.
	Cendres volcaniques		Dans la plupart des cas, le sol possède un nom local.

3.3.3.2 Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System), USBR ou "AC Systems" (Airfields Classifications Systems)

Cette classification mise au point par Casagrande (1942) pour les aéroports militaires a été par la suite modifiée. Il s'agit d'une classification simple à utiliser malgré son apparence. Elle a été dans le passé utilisée dans de nombreux pays européens tels que l'Autriche, l'Allemagne et la Suisse.

Elle se base sur le critère granulométrique et les limites d'Atterberg (I_p et W_L) et définit 15 sols types munis chacun d'un symbole à deux lettres avec toutefois des combinaisons possibles pour élargir le nombre de sol type et définir des sols mixtes :

- La **première lettre** correspond, soit à la **classe granulométrique** de la classification ASTM (**C**=Clay-argile, **M**=Mo - Limon, **S**= Sand - Sable, **G**= Gravel - Gravier), soit à un **sol organique (O)** ;
- La **deuxième lettre** dépend de la **nature du sol** :
 - **Sol grossier propre sans fines** : La lettre correspond au **classement granulométrique** (**W**= well graded, bien classé et **P**= poor graded, mal classé) ;
 - **Sol grossier contenant des fines** : La lettre correspond à la **nature des fines** (**C** = fines argileuses et **M** = fines limoneuses).
 - **Sol fin** : La lettre correspond à sa **déformabilité** (**H**: High et **L**: Low compressibility) ;
 - **Tourbe** : Elles prennent le symbole **Pt** (= Peat).

Elle distingue le **sol granulaire** et le **sol fin** sur base du passant à 75 µm et le sol fortement organique (*tourbe*).

- Le **sol granulaire** (% passant 75 µm < 50 %) est divisé en 2 parties sur base du refus de 4,75 mm.
 - **La grave** présente un refus supérieur à 50 % du poids ;
 - **Le sable** présente un refus inférieur à 50 % du poids.
- Le **sol fin** (% passant 75 µm ≥ 50 %) est également représenté dans le diagramme de Casagrande.

Tableau 3.XI - Classification USCS ou AC Systems.

Groupes principaux		Symbole	Type	Critère de classification		
Sol granulaire (passant à 75 µm < 50%)	Gravier (passant à 4,75 mm < 50%)	GW	Gravier ou mélange gravier - sable bien classé et propre	Précision sur % fines (75 µm) Si % fines < 5 % : GW ou GP Si % fines > 12 % : GM ou GC	$C_u > 4$ $1 < C_c < 3$	
		GP	Id. mais mal classé		Au moins un des deux critères ci-dessus non respecté	
	Graviers avec fines	GM	Gravier limoneux Mélange gravier - sable - limon		$I_p < 0,73 (W_L - 20)$ ou $I_p < 4$	Si $I_p = 4 - 7$ Et $I_p > 0,73 (W_L - 20)$
		GC	Gravier argileux Mélange gravier - sable - argile		$I_p > 0,73 (W_L - 20)$ ou $I_p > 7$	Utilisation des deux symboles

	Sable <i>(passant à 4,75 mm ≥ 50%)</i>	Sable propre	SW	Sable ou sable graveleux bien classé et propre	Précision sur % fines (75 µm) Si % fines < 5 % : SW ou SP Si % fines > 12 % : SM ou SC Si % fines = 5 - 12 % : 2 symboles	$C_u > 6$ $1 < C_c < 3$	
			SP	Id. mais mal classé		Au moins un des deux critères ci-dessus non respecté	
		Sable avec fines	SM	Sable limoneux Mélange sable - limon		Ip < 0,73 (W_L-20) ou Ip < 4	Si Ip = 4 - 7 Et Ip > 0,73 (W _L -20) Utilisation des deux symboles
			SC	Sable argileux Mélange sable - argile		Ip > 0,73 (W_L-20) ou Ip > 7	
Sol fin et organique <i>(passant à 75 µm ≥ 50%)</i> et sol organique	Limon et argile W _L < 50		ML	Limon inorganique Sable très fin Sable fin limoneux ou argileux	<p style="text-align: center;">Diagramme de Casagrande</p>		
			CL	Argile inorganique à plasticité moyenne à faible Argile graveleuse Argile sableuse Argile limoneuse Argile maigre			
			OL	Limon organique Argile limoneuse organique de faible plasticité			
	Limon et argile W _L ≥ 50	MH	Limon inorganique ou limon micacé Limon élastique Sable fin				
		CH	Argile inorganique à haute compressibilité Argile grasse				
		OH	Argile organique de compressibilité moyenne à élevée				
	Sol fortement organique		PT	Tourbe Sols très organiques		Les matériaux d'une même couche géologique sont représentés par un nuage de points subparallèles à la ligne A.	

3.3.3.3 Classification AASHO (1929)

La classification créée par TERZAGHI et HOGENTOGLER est basée sur les caractéristiques de stabilité du sol utilisé comme surface de roulement. Par la suite, elle a été maintes fois adaptée afin de trouver des applications dans la détermination de la qualité du sol utilisé dans les remblais, les matériaux d'infrastructure, de sous-fondation et de fondation. Cette classification n'aborde pas les autres matériaux comme les roches et les sous-produits industriels.

Elle permet de classer les sols en 8 familles (*sols normaux de A-1 à A-7 et les sols organiques A-8*) sur base de la granulométrie et des limites d'Atterberg (W_L et I_p).

Tableau 3.XII - Classification AASHO des sols.

Classe	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sous-classe	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A7-5 A7-6
% Passant											
Ø 2 mm (%)	≤ 50	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Ø 0,425 mm (%)	≤ 30	≤ 50	> 50	----	----	----	----	----	----	----	----
Ø 0,074 mm (%)				≤ 35				> 36			
W _L	----		----	≤ 40	> 41	≤ 40	> 41	≤ 40	> 41	≤ 40	> 41
I _p	≤ 6		N.P.	≤ 10		> 11		≤ 10		> 11	
Type usuel	Cailloux, gravier et sable		Sable fin	Gravier et sable silteux		Gravier et sable argileux		Sol silteux		Sol argileux	
Usage pour la sous-couche	Excellent à bon							Passable à pauvre			

Un paramètre "*Group Index*" (*GI*) calculé à partir d'une formule empirique permet de préciser le sol au sein de la classe :

$$GI^1 = (F - 35) * [0.2 + 0.005 * (W_L - 40)] + 0.01 * (F - 15) * (I_p - 10)$$

Avec F : % de passant au tamis de 0.074 mm (*exprimé sous forme de nombre entier*).

La dénomination finale de type A-3 (12) permet de déterminer la qualité relative du sol dans l'emploi de structures de terrassement. Cependant, pour les études de conception et de dimensionnement, des essais concernant les propriétés géomécaniques doivent être réalisés.

3.3.3.4 Classification de l'Administration des Routes Américaines

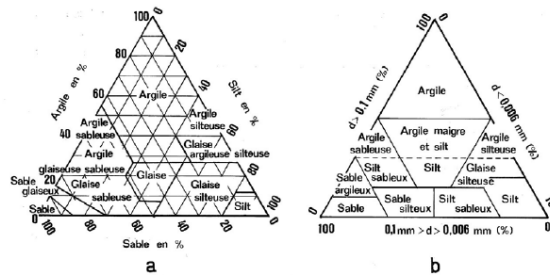


Fig. 120.13a, b. Diagramme triangulaire des sols.
a) D'après Pietrowski
b) D'après l'Administration des Routes Américaines.

Figure 3.8 – Diagrammes triangulaires des sols selon la classification de l'Administration des Routes américaines.

3.3.3.5 Classification USDA (sols agricoles)

Il s'agit d'une classification utilisée pour la description et le drainage des sols ainsi que pour certaines études de géologie du Quaternaire telles que les recherches sismiques de grande profondeur.

¹ Lorsque la valeur de GI est négative, elle équivaut automatiquement à zéro.

4. GESTION ENVIRONNEMENTALE DES SOLS WALLONS

Dans le contexte environnemental actuel, il importe d'éviter toute nouvelle pollution des sols et de traiter les pollutions existantes. La gestion des sols passe donc par une approche environnementale et concerne le respect d'une série de textes juridiques.

Or, la définition juridique d'un sol diffère de sa définition géotechnique. Ainsi, un sol se définit juridiquement comme la *couche superficielle de la croûte terrestre comprenant notamment les eaux souterraines, la faune et la flore*. C'est donc une définition plus large.

IMPORTANT : Un sol terrassé et évacué hors de la parcelle cadastrale du chantier n'est plus considéré comme un sol mais devient un déchet également appelé *terre*.

En pratique, le géotechnicien peut être confronté à cette approche environnementale dans deux cas de figure : 1) La présence ou la découverte en cours de chantier d'une pollution et 2) la gestion des terres quittant la parcelle du chantier afin de ne pas transmettre d'éventuelles pollutions ailleurs.

REMARQUE : Le présent ouvrage décrit brièvement les principaux textes juridiques à respecter en Région Wallonne. D'autres régions ou pays comme la Flandre, la Région Bruxelles-Capitale et la France sont très rapidement évoqués.

4.1 INTRODUCTION AUX TERMES JURIDIQUES

Les différents textes juridiques et documents associés font intervenir un certain nombre de termes qu'il importe de définir

Directive européenne : Document de portée générale concernant tous les états membres de la Communauté Européenne qui instaure une obligation de résultats mais laisse la liberté aux différents Etats-membres d'adopter les moyens pour y parvenir. Elle permet ainsi d'harmoniser les diverses législations nationales. Il ne s'applique donc qu'à travers des lois et des décrets nationaux.

Règlement européen : Document de portée générale concernant tous les états membres de la Communauté Européenne qui impose les modalités pour parvenir au résultat. Il est d'application immédiate sans transposition possible dans les différentes réglementations nationales.

Décision européenne : Acte juridique (et non législatif) à portée individuelle pris par une institution européenne vis-à-vis d'un destinataire (un ou plusieurs Etat-membres, groupe de particuliers, entreprises, etc.) qui prescrit les moyens pour parvenir au résultat sans possibilité de transposition dans le droit national.

Décret régional : Acte législatif votée par une région pour des domaines qui relèvent de ses compétences. C'est un document comparable à une loi fédérale. Il n'est applicable que s'il existe un ou des décrets adéquats. En Région Bruxelles-Capitale, ce document est une Ordonnance Régionale et a pratiquement ordre de loi.

Arrêté du Gouvernement Wallon (AGW) : Acte réglementaire adopté par le Gouvernement wallon permettant de mettre en œuvre les décisions d'un décret notamment.

Terrain pollué : Terrain où la pollution du sol est avérée.

Terrain potentiellement polluée : Terrain où la pollution est suspectée suite à la présence d'une activité polluante (présente ou passée), de déchets ou d'un accident survenu.

Terrain sain : Terrain pour laquelle il n'y a pas de pollution.

Polluant : Toute substance ou organisme responsable d'une pollution générée par l'activité humaine.

Pollution historique : Pollution datant d'avant le 30 avril 1997 (Directive Européenne sur la responsabilité environnementale).

Pollution nouvelle : Pollution datant d'après le 30 avril 1997.

Pollution mixte : Pollution étalonnée de part et d'autre de la date du 30 avril 1997. En Wallonie, elle rentre souvent dans la catégorie pollution nouvelle, contrairement aux deux autres régions belges.

Valeur de référence : Valeur indicative de concentration de fond en polluant attendue dans le sol sans tenir compte des variations géologiques et de l'activité agricole ou urbaine générale.

Concentration de fond : Valeur ambiante du polluant dans le sol liée, soit au contexte géologique du sol, soit à l'activité agricole, industrielle ou urbaine générale. Les valeurs font l'objet de cartes sans cesse mises à jour.

Valeur-seuil : Concentration en polluant dans le sol à partir de laquelle un sol est potentiellement pollué et pour laquelle une étude de caractérisation est nécessaire. Il s'agit d'une valeur clé dans la détermination des opérations à mener et certains objectifs du traitement à atteindre (souvent 80 %). Les valeurs dépendent du type d'usage du terrain et sont fournies dans certains guide (GRGT par exemple).

Valeur d'intervention : Concentration en polluant à partir de laquelle une intervention sous forme d'assainissement, de prise de mesures de sécurité ou de suivi est nécessaire.

Valeur particulière : Valeur constatée lors d'une étude d'orientation, de caractérisation ou atteinte lors de la procédure d'assainissement et déterminée dans le certificat de contrôle du sol.

Menace : Pollution du sol constituant une menace grave pouvant porter atteinte, soit aux hommes, à la faune et à la flore, soit aux réserves en eaux potabilisables.

Certificat de contrôle du sol : Certificat délivré par le Gouvernement wallon consignait les raisons d'une intervention (orientation, caractérisation ou assainissement) et le fait que les concentrations atteintes sont conformes aux exigences du décret.

Mesures de sécurité : Ensemble de mesures destinées à maîtriser les effets d'une pollution du sol ou à en prévenir l'apparition et comprenant des restrictions d'accès et d'utilisation à l'exception des travaux d'assainissement du sol.

Type d'usage : Usage ou activité de la parcelle considérée. La Wallonie distingue 5 types distincts variant de 1 à 5 avec une sensibilité décroissante (valeurs seuils de plus en plus grandes) : 1) Naturel, 2) Agricole, 3) Habitat, 4) Récréatif ou commercial et 5) Industriel.

Usage de droit : Usage défini selon le plan de secteur.

Usage de fait : Usage défini selon l'activité de la parcelle.

REMARQUE : Il existe des différences entre les deux types d'usage. Ainsi, pour une station d'essence située dans un quartier résidentiel, l'usage de droit est de type 3 (zone résidentielle au plan de secteur) alors que l'usage de fait est de type 5 (industriel).

4.2 PRESENCE ET DECOUVERTE D'UNE POLLUTION EN WALLONIE

4.2.1 Textes de référence

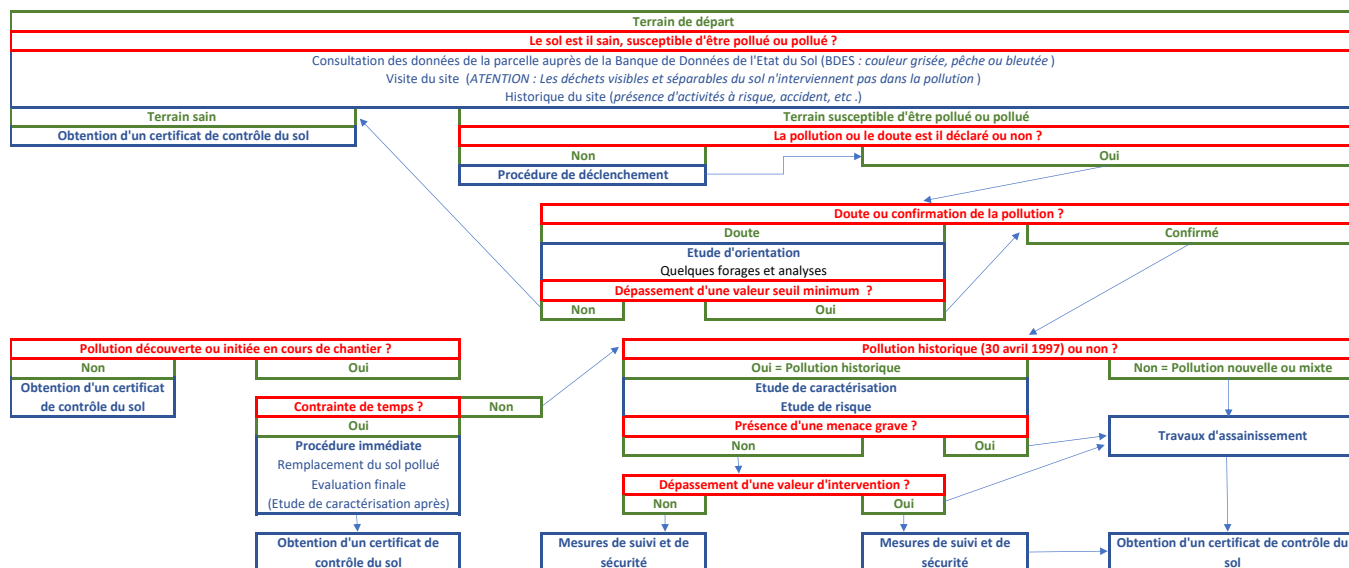
Les principaux documents de référence sont :

- Le **décret Sol du 1^{er} mars 2018** (gestion et assainissement) est totalement effectif à l'inverse des autres décrets précédents (décret 2008).
- La **Banque de Données de l'Etat des Sols (BDES)** est une base de données régulièrement actualisée reprenant pour un bon nombre de parcelles cadastrales, des informations sur la présence ou non, voire d'un doute de pollution, les dossiers techniques (déjà réalisés ou en cours) de réalisation et des données de nature strictement indicative. Les parcelles sont ainsi colorées en 3 couleurs possibles :
 - Les parcelles grisées sont celles dont on ne dispose d'aucune données. Ce sont actuellement les plus importantes en termes de surface (plus de 90 % du parcellaire) ;
 - Les parcelles en couleur pêche disposent de **données** (documents officiels conformément à l'Article 19 du Décret Sol) obtenues dans le cadre d'une pollution avérée, douteuse ou résiduelle (ayant fait l'objet d'une partie ou de la totalité de la procédure reprise ci-dessous), d'un transfert de terres (décret terres excavées) ou encore d'une demande de certains permis (installation présentant un risque sol). Elles couvrent moins de 10 % des surfaces actuelles ;
 - Les parcelles en lavande concernent des informations (données non déclarées et non concernées par l'Article 19 du Décret Sol) sur l'état du sol comme la présence d'un remblai, d'un sol pollué ou d'une ancienne activité à risque. L'Administration wallonne décide au cas par cas de les faire passer sous forme de données ou pas. Elles couvrent moins de 10 % des surfaces actuelles.

4.2.2 Comment procéder en cas de pollution ou de doute ?

Le tableau ci-dessous reprend les principales situations à laquelle peut être confronté un géotechnicien : 1) le sol est reconnu comme un **sol pollué avant les travaux**, 2) il existe un **doute sur la présence d'une pollution** sur le terrain, 3) une **pollution est découverte ou initiée** (suite à un accident) en cours de chantier.

Dans les deux premiers cas, une procédure classique doit être réalisée. Dans le troisième cas, une procédure accélérée peut être également réalisée afin de ne pas ralentir les travaux en cours, notamment les travaux routiers et ferroviaires.



4.2.2.1 Procédure classique

En cas de pollution avérée ou d'un doute de pollution, plusieurs étapes peuvent être réalisées :

- **Procédure de déclenchement** : La procédure *peut être* déclenchée de manière volontaire (*propre initiative*) et *doit être* déclenchée lors de certains faits générateurs d'obligations (*demande, renouvellement ou retrait de certains permis à risque ou en zone de couleur pêche, cessation d'activité à risque, faillite, etc.*) ou suit à une demande de l'Administration en cas de suspicion ou lors d'une découverte d'une pollution ;

REMARQUE : La création et la rénovation de voiries ainsi que la pose d'impétrants ne sont pas considérées comme un fait générateur.

- **Etude d'orientation** : Cette étude concerne les cas de suspicion de pollution ou d'arrêt d'activité à risque (*fin ou retrait du permis, faillite, etc.*). Elle est réalisée par un expert qui propose de réaliser quelques forages avec prélèvement d'échantillons et analyses de sol et d'eau en vue de déterminer s'il y a ou pas une pollution sur base d'une comparaison avec des valeurs de référence (*valeurs-seuils ou valeurs d'intervention*) ;
- **Etude de caractérisation** : Cette étude a comme objectif de bien représenter la pollution au sein de la parcelle afin de définir les techniques d'assainissement ou les mesures de suivi et de sécurité les plus adéquates au traitement ou à la neutralisation de la pollution. Cette opération réalisée par un expert comporte plusieurs forages et prélèvements de sols et d'eau ainsi que des analyses dont les résultats sont comparés avec des valeurs d'intervention.
- **Etude de risques** : Cette étude doit montrer si la pollution représente une menace grave ou pas pour l'écosystème, l'humain et l'eau liés à la parcelle ;
- **Travaux d'assainissement** : L'objectif de ces travaux est d'éliminer, neutraliser, immobiliser ou confiner sur place la pollution avec des moyens techniques adéquats et économiques rentables. Ils sont prescrits par l'expert et réalisés par une société agréée pour ce type d'opérations sous le contrôle de l'expert. Les objectifs à atteindre dépendent de la nature de la pollution :
 - *En cas de pollution historique*, les objectifs sont d'atteindre des valeurs proches de la valeur de référence et de supprimer toute menace grave ;
 - *En cas de pollution nouvelle ou mixte*, l'objectif est de restaurer le sol au niveau des valeurs de référence pondérées par les concentrations de fond ou à un niveau le plus proche (*valeur particulière*) selon les meilleures techniques disponibles n'entraînant pas de coûts excessifs (*principe du BATNEEC*) ;
- **Mesures de suivi et de sécurité** : Ces mesures doivent empêcher toute progression de la pollution ;
- **Certificat de contrôle du sol** : document garantissant une certaine qualité du sol et spécifiant éventuellement les mesures de suivi et de sécurité y associées.

4.2.2.2 Procédure immédiate pour pollution fortuite d'ouvrages linéaires (routes, voies ferrées, etc.)

Vu les délais très courts et la nécessité de ne pas maintenir les structures linéaires fermées trop longtemps, la législation a fait une exception pour deux cas particuliers :

- **Présence d'une suspicion de pollution fortuite en cours de chantier** : La suspicion peut être évoquée en présence d'aspects visuels anormaux et d'éventuelles odeurs mais il n'existe aucune analyse chimique sur ce sol. Deux possibilités existent :
 - *On ne fait rien (le sol est laissé en place)* car on considère le sol non pollué. Cette solution bon marché constitue toutefois un risque pour le futur ;
 - *On réalise un contrôle de la qualité des terres* au moyen du Paquet Standard d'Analyses (PSA) et on compare les résultats avec les valeurs seuils (≤ 80 % valeur-seuil) selon le type d'usage final. En cas de dépassement de minimum une valeur, la pollution est alors dite connue.
- **Présence d'une connaissance de pollution fortuite en cours de chantier** : Une pollution est *connue* à partir du moment où des analyses chimiques sont faites et montrent la présence d'un ou de plusieurs dépassements de valeurs seuils (80 % VS). Dans ce cas, plusieurs actions sont nécessaires ;
 - *Avertir la DAS (Direction Assainissement du Sol) et/ou la Commune (lire article 6 du décret pour le libellé exact)* ;
 - *Favoriser le maintien en place du sol pollué*, moyennant un éventuel traitement ;
 - *Excaver et envoyer les terres en CTA (Centre de Traitement Agréé)* si le traitement n'est pas possible. Cela engendre un coût élevé.

REMARQUE : La Région Wallonne peut subsidier ces démarches pour autant qu'il existe une campagne de reconnaissance préalable valable et n'ayant pas montré de pollution et qu'il est prouvé que la pollution est fortuite.

4.3 GESTION DES TERRES EXCAVEES EN WALLONIE

Ce chapitre concerne tout travaux de terrassement dont un certain volume de sol quitte la parcelle du chantier et devient une terre. Il importe de ne pas polluer le site récepteur.

4.3.1 Textes et documents de référence en Wallonie

Les principaux documents de référence sont :

- Le *Décret Terres excavées du 1^{er} mars 2018* et son *AGW du 5 avril 2018* définissent les conditions d'analyse des terres à évacuer de transport et de réception ;

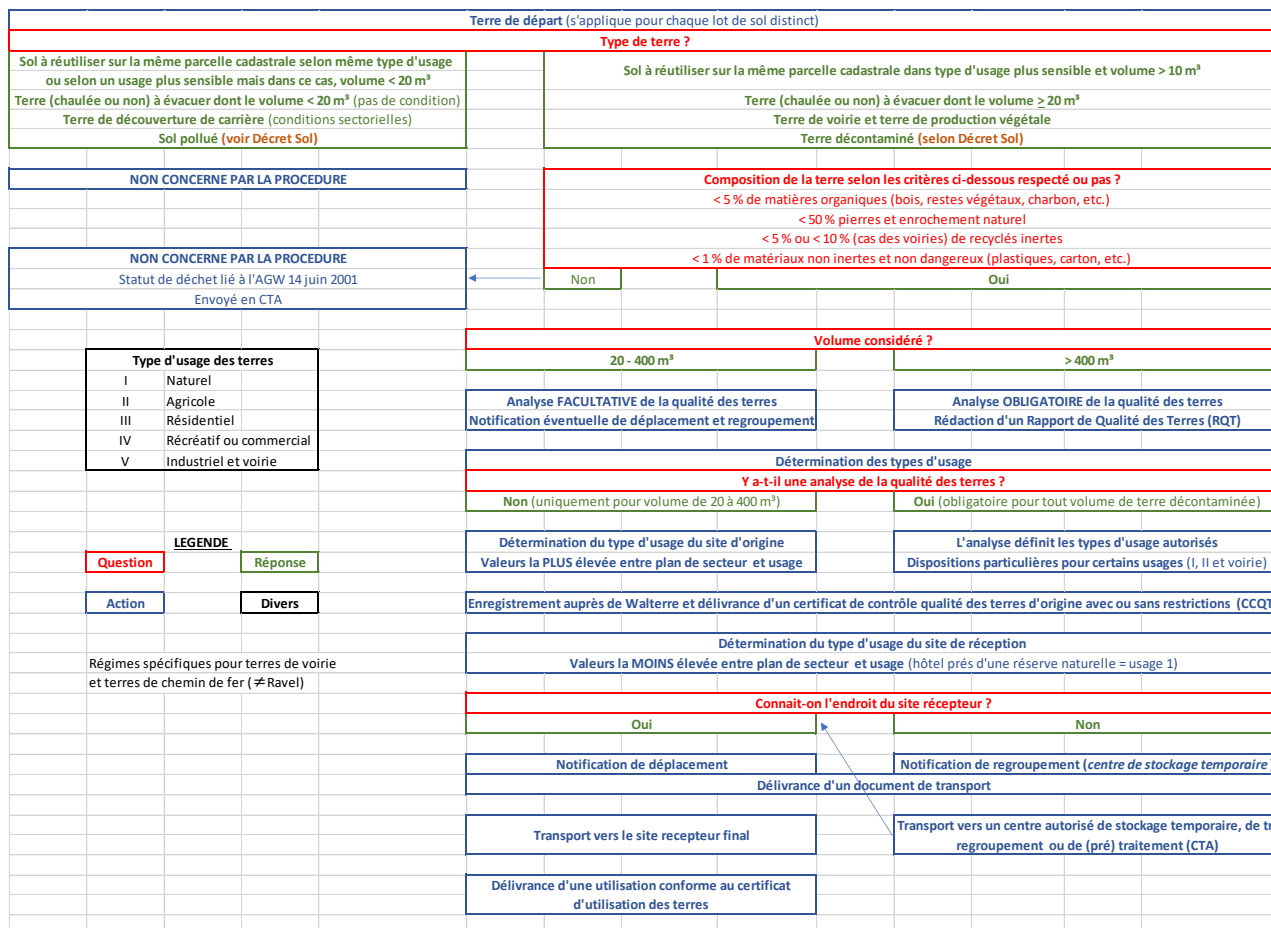
REMARQUE : Ce décret annule les valeurs de l'annexe 1 (sols) de l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets comme les terres de déblais (code EURAL 17 05 04) et les terres décontaminées (code 19 13 02).

- Le *Décret Gestion et assainissement des sols du 1^{er} mars 2018* et son *AGW Gestion et traçabilité des terres du 5 juillet 2018* définissent les conditions d'enregistrement des analyses de terre, de l'évacuation, du transport et de réception des terres auprès de la plateforme actuelle *Walterre* afin d'avoir une certaine traçabilité des terres depuis leur site d'origine jusqu'à leur site de réception en passant par le transport. Il a été modifié par la suite pour mieux tenir compte de la situation ;

REMARQUE : Cette démarche existe en Flandre depuis la fin des années 1990 avec notamment la plateforme *Grondbank*. D'autre part, Walterre a une concession de 12 ans.

- Le *Guide de Référence relatif à la Gestion des Terres (GRGT)* est un guide technique rédigé par l'ISSeP. Il ne s'agit donc pas d'un document légal au sens juridique car il peut être rapidement modifié sans passer par la procédure juridique classique. Il définit les conditions d'échantillonnage et d'analyse des terres ainsi que les critères de définition d'une terre et d'une pollution en fonction des valeurs d'usage à considérer.

4.3.2 Comment procéder ?



Les remarques suivantes peuvent être faites par rapport à la figure ci-dessus :

- **Walterre** est l'organisme créé en 2019 qui dispose actuellement de la concession (*durant 12 ans*) pour gérer la traçabilité des terres ;
- Le **site d'origine** se définit comme *le site où est extrait la terre*. Dans la procédure de permis et la déclaration auprès de Walterre, il convient parfois d'élargir la superficie de ce site pour tenir compte d'une surface de stockage provisoire des terres et ne pas être obligé de faire deux démarches séparément ;
- Un **site suspect** est un *site où une pollution est suspectée*. Pour ces terrains, non seulement le respect de la sensibilité des types d'usage doit être appliqué, mais aussi la réutilisation des terres doit être conforme au CCS (Contrôle du sol). Trois types existent :
 - *Une parcelle située en zone lavande ou pêche* dans la BDES (Banque de Données de l'Etat des Sols) ;
 - *Une zone où est présente une activité à risque*. De même, lors d'une demande de permis pour développer une activité à risque sur une zone blanche, la parcelle prend automatiquement le statut de site suspect ;
 - *Une zone où est découvert une pollution*.

Il existe néanmoins toute une série d'exceptions comme les sites à risque ayant obtenu une dérogation (article 73) ;

- **La terre excavée dont le volume est inférieur à 20 m³** (valeur initiale de 10 m³), pour autant qu'elle ne montre pas de trace de pollution peut être envoyée sans contrôle et enregistrement auprès de Walterre, soit vers un autre chantier, soit vers un centre de regroupement. En cas de suspicion, le site récepteur peut réclamer une analyse ;
- **Toute terre décontaminée** dans un centre de traitement agréé (CTA) doit avoir une analyse de terre, quel que soit son volume ;
- La **détermination du type d'usage** dans le cas où il n'y a pas d'analyse (volume de terre compris entre 20 et 400 m³), nécessite une comparaison entre l'usage de droit (plan de secteur) et l'usage de fait (activité de la parcelle). Le choix du type d'usage varie selon le site :

- Pour un site d'origine, c'est la valeur la plus élevée de type d'usage et donc la moins sensible qui prédomine. Ainsi, une terre issue d'une station d'essence (usage de fait de type 5 : industriel) située dans un quartier résidentiel (usage de droit de type 3 : résidentiel) se définit comme un usage de type 5 ;
- Pour un site récepteur, c'est la valeur la plus faible du type d'usage qui prédomine. Ainsi, un hôtel (usage de fait de type 4) située dans une zone naturelle (usage de droit de type 1) ne peut recevoir que des terres de type 1.
- Dans le cas où le volume de terre dépasse 400 m³, la démarche diffère selon le type d'usage du site d'origine :
 - Si le site d'origine est de type d'usage I et II (naturel et agricole), une notification de déplacement, voire de regroupement doit être réalisée **sans** contrôle de la qualité du sol ;
 - Si le site d'origine est de type d'usage III, IV et V (résidentiel, récréatif et industriel), la démarche classique doit être réalisée, à savoir une notification de déplacement, voire de regroupement **avec** contrôle de la qualité du sol ;
 - Si le site d'origine concerne des travaux de voirie, deux situations peuvent avoir lieu selon que le site de réception est un autre chantier de voirie (notification sans contrôle de la qualité des terres) ou pas (notification avec contrôle de la qualité des terres).

4.3.3 Logiciel de gestion des terres Utiliterre

En 2021, un groupe d'ingénieurs spécialisés dans l'environnement a mis au point, un site d'échange concernant la gestion de terres excavés, de sable et de granulats en Wallonie, le site utiliterre. be.

4.4 SITUATION DANS D'AUTRES REGIONS ET PAYS

La gestion des terres excavées dans les autres régions et pays avoisinants à la Wallonie présentent des similitudes en termes de principe. Par contre, des différences parfois importantes et contradictoires (entre les textes juridiques européens, nationaux et régionaux) peuvent apparaître en ce qui concerne les valeurs-seuils de polluants.

4.4.1 Flandre

La gestion des terres en Flandre est régie principalement par le Vlarebo.

La Région Flamande dispose d'un système de traçabilité des terres similaire à celui de la Wallonie depuis le début des années 2000. Deux organismes gèrent ce système : Grondbank et

REMARQUE : Le système de traçabilité wallon s'est inspiré du système flamand.

4.4.2 Région Bruxelles - Capitale

4.4.3 France

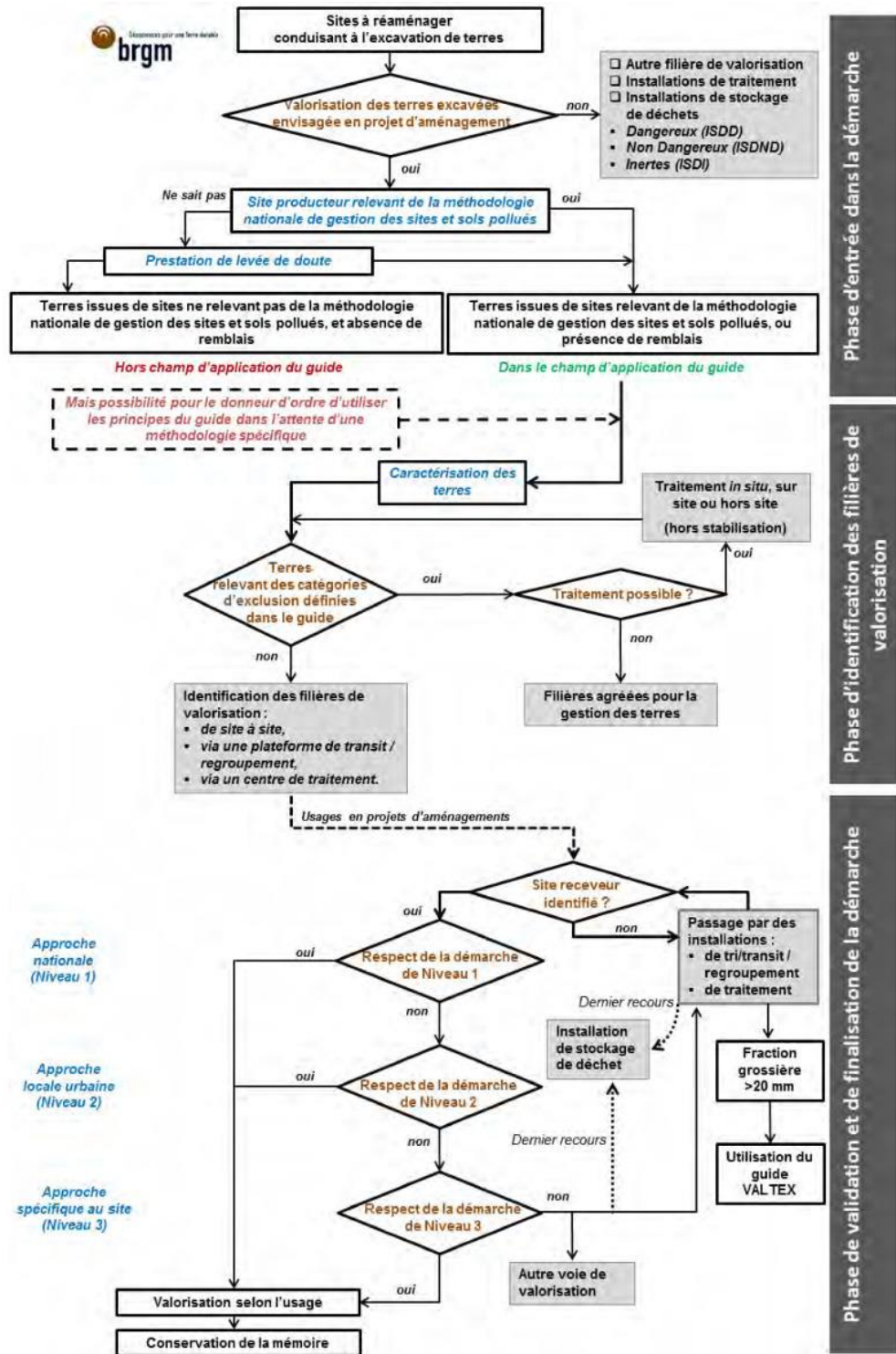
La gestion des terres excavées passe notamment par l'utilisation du logiciel **TERRASS** (Terres Excavées Réutilisées de façon Raisonné dans des Aménagements en Sous-structures).

Plusieurs labels de qualité des sites de gestion des déchets du BTP existent :

- Le label **Qualirecycle BTP** est généraliste et concerne l'ensemble du territoire français ;
- Le label **Recyterre** a été établi principalement par deux syndicats (FEDEREC BTP et SEDDRé) pour les travaux du Grand Paris (2017 - 2027). Ce gage de pratiques d'excellence doit constituer un bon outil de promotion pour les exploitants de plateforme tout en servant d'outil d'évaluation des performances et de l'amélioration continue. Il fixe les standards de qualité de l'activité de valorisation et de recyclage des terres ni dangereuses, ni polluées aux différents niveaux de traitement (entrée, gestion interne des tas, traitement à proprement parlé, respect environnemental et sortie). Il porte plus sur les outils de traitement que sur la qualité des matériaux issus du recyclage. Il existe trois niveaux de label : engagé, confirmé et exemplaire.

Le ministère de la Transition écologique en collaboration avec le BRGM a publié en 2017, un guide technique reprenant notamment la démarche à suivre afin de privilégier la valorisation de ces terres. La démarche est assez similaire aux démarches belges. Le principe de dilution est interdit.

Le principe général de la démarche est repris ci-dessous.



Guide de valorisation hors site des terres excavées dans des projets d'aménagement – Novembre 2017

Figure 4.1 : Procédure générale concernant la valorisation des terres excavées en France (Source : BRGM).

Les terres ne peuvent aller que sur certains sites dont la qualité du sol est similaire aux terres reçues. Elles doivent être recouvertes et doivent préserver l'écosystème. Ainsi, des terres destinées à des zones Natura 2000 ou similaires doivent faire l'objet de mesures particulières.

4.4.4 Grand-Duché du Luxembourg

Au Luxembourg, 98 % des terres excavées sont considérées comme inerte. Pour des raisons économiques et administratives, ces terres sont préférentiellement versées dans de grandes décharges pour déchets inertes plutôt que d'être valorisées en remblai, terre agricole ou en de nouveaux matériaux de construction (*clinker, granulats, brique, etc.*). Toutefois, cette solution n'est pas durable, vu le remplissage des décharges et la difficulté à en ouvrir de nouvelles. Une approche pratiquée pour éviter cela consiste à réaliser plusieurs petites décharges mieux réparties géographiquement et plus facilement acceptées par les riverains. Mais cela reste également non viable à terme.

Les 2 % de terres inertes (*terres dépassant les valeurs seuils*) sont envoyées en décharges pour déchets non inertes situées à l'étranger (*Belgique, Allemagne et France*), vu l'absence de ce type de décharge au Luxembourg.

En termes de textes juridiques, le Grand-Duché de Luxembourg ne dispose pas actuellement de textes officiels pour protéger les sols, assurer une traçabilité des terres excavées et gérer les sols pollués. Des articles sont en cours de rédaction (2021).

5. PRINCIPALES FILIERES DE VALORISATION DES TERRES EXCAVEES

5.1 TERRES INERTES ET TERRES DECONTAMINEES

Les terres inertes et décontaminées peuvent être valorisées dans les applications suivantes

5.1.1 Remblais techniques et autres

Le remblai qu'il soit *technique* (*remblai sous un ouvrage quelconque et devant répondre à des critères bien spécifiques*), *paysager* (*remblai permettant un profilage de la topographie et devant répondre à des critères peu stricts comme la portance immédiate*) ou autres, constitue une bonne filière de valorisation des terres excavées inertes.

La terre peut être mise directement en remblai si elle possède les caractéristiques adéquates comme la teneur en eau initiale comprise dans la bonne partie de la courbe Proctor.

Un traitement au liant (*chaux, LHR ou ciment*) peut être réalisé, soit *in situ*, soit dans une plateforme de regroupement. En présence d'éléments grossiers, un précriblage ou scalpage est nécessaire pour éliminer les éléments grossiers (*diamètre souvent supérieur à 50 mm*). Ces derniers peuvent être réutilisés dans d'autres applications, moyennant un éventuel traitement (*concassage et criblage secondaire*).

Le traitement en centre permet de stocker les terres réceptionnées en lots relativement uniformes en termes de granulométrie et d'hydrométrie afin d'avoir un produit traité le plus homogène possible.

REMARQUE : La société française Devarem a mis au point un dispositif de pulvémixage® qui consiste à pulvériser les différents éléments ensemble de manière à obtenir une homogénéisation optimale. Cette opération nécessite un criblage spécifique au préalable mais permet d'utiliser le mélange en couche de forme ou sous une plateforme de bâtiment.

5.1.2 Sous-fondation routière

La terre excavée peut être valorisée en sous-fondation routière, moyennant un traitement de stabilisation spécifique (*étude de formulation plus poussée, dosage plus important, etc.*).

5.1.3 Nouveaux matériaux de construction

5.1.3.1 Clinker

Un sol contenant une certaine teneur en argile peut être valorisé comme source d'argile pour un clinker.

5.1.3.2 Briques en terre crue

Plusieurs sociétés (*BC Materials en Belgique, Clamens en France, Geobloc au Luxembourg, Terrabloc en Suisse*) ont développé une brique crue à partir d'un mélange de terre de terrassement en y incluant souvent d'autres matières comme de l'argile pure, des granulats, de la chaux ou un liant hydraulique, voire des boues filtrées. Certaines sociétés disposent d'un dispositif mobile de production qui peut se rendre sur chantier.

Cette brique présente de bonnes caractéristiques en termes de résistances, d'inertie thermique, de régulation hygrométrique ou encore de résistance au feu. Elle peut être utilisée en décoration intérieure ou comme cloison qui intègre les canalisations. De plus, elle est 100 % recyclable et facile à retraiter.

5.1.3.3 Récupération des granulats

Dans le cas de terre riche en graviers, un criblage préalable permet d'extraire la fraction grossière qui est ensuite transformé en granulats. Ce genre de valorisation qui nécessite un certain volume potentiel est prévue pour les travaux du Grand-Paris.

5.1.4 Sols organiques

La terre excavée peut être amendée de telle sorte à devenir un sol organique. A ce sujet, la société française Microhumus a mis au point une terre végétale artificielle (*SubsTer*) à partir d'un mélange d'amendement agricole et de terres peu commercialisables comme les terres excavées mais aussi une terre dépolluée (*selon la situation*), une terre de découverte ou encore un sédiment de dragage très peu pollué. Les teneurs précises dépendent de la composition du matériau. Ces terres acceptent des plantes bien spécifiques.

5.2 TERRES EXCAVEES POLLUEES

REMARQUE : Une terre polluée contenant 1% d'amiante est considérée en Wallonie comme une terre polluée (*code EURAL : 17 05 03*).

Une terre polluée doit être traitée avant de pouvoir être valorisée dans de nouvelles applications.

De nombreuses méthodes de traitement peuvent être utilisées selon la nature et le comportement des polluants (*hydrocarbures, métaux lourds, etc.*), leur teneur, le volume des terres à traiter le lieu de traitement ou encore les contraintes du site (*accessibilité et surface disponible, délai, budget, ...*).

Ces différentes méthodes peuvent se répartir au sein de 3 familles de traitement qui peuvent coexister sur le même chantier. Les avantages et inconvénients de chaque famille sont repris dans le tableau ci-dessous.

- Le **traitement in situ** se fait directement dans le sol en place et nécessite souvent l'emploi de forages et d'ouvrages d'injection ;
- Le **traitement sur site** ou **on site** consiste à excaver le sol pollué et à le traiter dans l'enceinte du chantier, via un dispositif mobile de traitement avant de le remettre éventuellement en place ou de l'évacuer ;
- Le **traitement hors site** ou **ex situ** consiste à transporter la terre excavée hors du chantier vers une installation fixe où elle sera traitée par un ou plusieurs dispositifs spécifiques. La terre ainsi décontaminée peut éventuellement revenir sur site. Le transport et le stockage des terres polluées est soumis à certaines réglementations bien spécifique (*organisme de transport agréé, rédaction de bons de transport et de réception, stockage en lots distincts sur une plateforme étanche et munie d'un dispositif de récolte des eaux, etc.*).

Tableau 5.I - Tableau comparatif des familles de traitement des sols pollués.

	Traitement <i>in situ</i>	Traitement sur site	Traitement hors site
<i>Avantages</i>	Traitement simultanée de la totalité des terres et de l'eau Absence de frais d'excavation et de transport des terrains pollués	Traitement de la totalité des terres Pas de frais de transport et de nuisances	Traitement de l'entièreté du sol avec triage par la suite à la station Traitement généralement plus efficace
<i>Inconvénients</i>	Difficulté de contrôler totalement les paramètres et le suivi du traitement	Frais d'installation souvent élevé de la centrale de décontamination mobile	Frais de transport important et proportionnels à la distance site - centre de traitement (<i>parfois supérieure à 100 km</i>) Transport délicat et amenant souvent des nuisances (<i>bruit, poussières, encombrement routier</i>) Les centres ne traitent souvent qu'un groupe restreint de polluants. Cela nécessite un triage des terres polluées sur site avec risque de pollution supplémentaire

5.2.1 Opération de décontamination

Selon le type de pollution, plusieurs traitements existent et peuvent être appliqués.

5.2.1.1 Traitement physique

Le traitement physique consiste principalement à séparer la fraction fine ($\varnothing < 63 \mu m$) généralement plus argileuse et polluée du reste des fractions granulaires généralement moins pollués. Cela s'effectue généralement au moyen d'hydrocyclone.

Toutefois, la fraction grossière peut encore contenir certains polluants comme de la matière organique, des HAP, huiles minérales ou métaux lourds. Des dispositifs particuliers de séparateur (*séparateur à lit fluidifié en phase liquide pour la matière organique, séparateur magnétique pour certains métaux lourds, séparateur à courant de Foucault et jig pour les métaux non ferreux et le gypse*) sont utilisés, comme c'est le cas à la société Bioterra (Genk).

5.2.1.2 Traitement biologique

a. Traitement par bioremédiation

Le traitement biologique par bioremédiation s'applique principalement à une terre polluée aux huiles minérales.

Le principe du traitement consiste à éliminer les agents polluants au moyen de bactéries présentes naturellement ou artificiellement dans le sol mis en andains et ce, en présence d'oxygène.

Le traitement comporte souvent les étapes suivantes :

- L'**étape de prétraitement** consiste à cribler les terres afin de pouvoir séparer les éléments exogènes des particules fines (*terres*). Cette opération se produit généralement dans un hall fermé et muni d'un dispositif spécifique d'aspiration et de traitement de l'air ;
- L'**étape de traitement à proprement parlé** consiste à mettre en andains, les terres et à les retourner périodiquement afin de faciliter leur apport en oxygène et accélère ainsi le processus de dégradation biologique par les organismes présents. Cette étape dure approximativement 6 mois. Dans certains cas, des organismes supplémentaires sont ajoutés pour accélérer la procédure.

5.2.1.3 Traitement chimique

Le principal traitement consiste à traiter la terre avec un liant en vue d'inertiser les agents polluants.

REMARQUE : La terre traitée à la chaux en vue d'une augmentation des résistances mécaniques se caractérise par le code EURAL 17 05 04. Par contre, la terre polluée traitée à la chaux est reprise sous le code EURAL 19 12 12.

5.2.1.4 Traitement physico-chimique

La société Envisan dispose d'une installation de traitement physico-chimique des sols contaminés ainsi que des sédiments déshydratés dans la région liégeoise (*île Monsin*) qui permet de les valoriser en matières brutes secondaires.

5.2.1.5 Traitement thermique

5.2.1.6 Mise en décharge des terres excavées polluées

5.3 CLASSIFICATION ET CHOIX DES TECHNIQUES

5.3.1 Critères de choix

Le choix de la technique d'assainissement la plus adaptée dépend de plusieurs paramètres repartis en 4 groupes :

- Les **propriétés des polluants** sont principalement au nombre de 3 paramètres :
 - Les polluants organiques ou non ;
 - Les polluants volatils ou non ;
 - Les polluants biodégradables ou non ;
- Les **propriétés du milieu (sol et eau)**
 - L'arrangement granulométrique définit le volume et la structure des espaces lacunaires, siège des processus de transfert des fluides et de développement des micro-organismes. De plus, la présence de particules argileuses tend à retenir les polluants, via tout un ensemble de réactions chimiques.
 - La perméabilité : les techniques "in situ" sont moins efficaces pour les terrains peu perméables (*argiles, limons*)
 - L'acidité
 - La teneur en Al, Fe et Mn
 - Les matières organiques et les nutriments
 - Les conditions physico-chimiques constituent une limite pour certains traitements "in situ".
 - La stabilité du sol : en présence de sols peu stables ou instables, il ne faut pas réaliser des tranchées.
- Les **contraintes liées au site et à la pollution**
 - La présence de bâtiments
 - La profondeur de la pollution
 - La surface de la zone contaminée
- Les **objectifs du Maître d'Ouvrage**
 - Les solutions à court terme nécessitent généralement un coût immédiat élevé ;

- Les solutions à long terme permettent de limiter les coûts à court terme mais peuvent présenter des coûts opérationnels élevés à long terme.

5.4 TRAITEMENT DES SOLS HORS SITE

Tableau 5.II – Principales techniques hors site

	Techniques	Polluants traitables	Coût moyen (€/t)	Avantages	Inconvénients
<i>Processus biologiques</i>	Mis en andains Bioterre Phytoremédiation	Hydrocarbures aliphatiques Hydrocarbures aromatiques	20 - 30		
<i>Processus physiques</i>	Lavage physique		30 - 75		
<i>Processus thermiques</i>	Désorption thermique	Tout contaminant organique	70 - 80	Méthode rapide Tout type de sol Méthode à long terme Applicable sur site	Forte consommation énergivore Permis difficile à obtenir car technique proche de l'incinération Ne convient pas pour métaux lourds

5.4.1 Travaux préalables avant traitement hors site

Ce mode de traitement consiste à réaliser 3 opérations avant de pouvoir traiter les sols pollués hors site.

5.4.1.1 Excavation

L'*excavation* ou le *terrassement* désigne l'ensemble des opérations d'enlèvement des terres contaminées sur une zone préalablement définie et des mesures annexes à ces opérations comme :

- Les *mesures de soutènement* d'ouvrages situés à proximité
- Le *rabattement de la nappe* avec ou sans traitement des eaux
- Le *tri sur site* au moyen d'une unité mobile ou d'un godet cribleur (*petit chantier*) peut être réalisé afin de séparer les matériaux en fonction de leur granulométrie et de concentrer les polluants dans les fractions les plus fines qui sont alors transportés. Cela permet de réduire le transport de 20 à 40%. Cette opération n'est réalisée qu'en présence de matériaux à granulométrie étalée et contenant des blocs et pierres. Elle est efficace pour les inorganiques et s'applique au cas par cas pour les matières organiques.

5.4.1.2 Transport

5.4.1.3 Réception et stockage en centre de traitement

5.4.2 Traitement par voie biologique

Le principe consiste en une dégradation naturelle des polluants par certains micro-organismes présents dans le sol, qui les utilisent comme source nutritive et les transforment en CO₂, H₂O et autres sous-produits non toxiques.

Cette activité de dégradation microbienne est généralement stimulée par l'addition de nutriments et d'oxygène dans le sol et par la maîtrise des conditions de température, d'humidité et d'acidité.

Cette technique convient pour des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (*benzène, toluène, xylène, ...*). Il s'agit de chaînes courtes de carbone qui alignent 8 à 10 atomes et non pas de chaînes longues (30 à 40). Pour ces dernières chaînes, un traitement physico-chimique convient mieux. Ainsi, la majorité des terres polluées et traitées par voie biologique provient de stations-services, garages, terres autour de citernes à mazout et autres terres semblables.

La décontamination est parfois suivie d'un traitement de stabilisation à la chaux afin notamment de faciliter le criblage.

La société française Microhumus a mis au point le dispositif "*Agrophyto*" qui permet sur base d'une analyse détaillée préalable du sol à traiter de réaliser économiquement une composition de plantes qui a 3 actions.

- La *phytodégradation des molécules organiques* (BTEX, HAP, hydrocarbures totaux ou organochlorés) et des *cyanures*.

- La **phytoextraction de métaux** (*cadmium, cobalt, cuivre, nickel, plomb, zinc, etc.*) avec accumulation dans les parties aériennes des plantes.
- La **phytostabilisation des polluants** à l'intérieur de la matrice des sols.

5.4.2.1 Mise en andains

La technique consiste à réaliser de longs tas étroits de terre appelés **andains** et à les retourner régulièrement afin de les homogénéiser, de les aérer et d'ajouter éventuellement des adjuvants. Cette technique est similaire à celle utilisée pour le compostage.

De manière générale, les andains ont une hauteur qui varie entre 0,5 et 3 m et des largeurs de l'ordre de 3 à 6 m.

L'équipement utilisé pour retourner les andains est déterminé par les dimensions du tas et l'espacement entre les différents tas. Les chargeuses/pelleteuses, dotées d'une longue portée, peuvent construire des andains hauts. Les retourneuses produisent des andains larges et bas. Pour les andains de petite à moyenne taille, le retournement peut être effectué à l'aide d'un chargeur frontal ou d'une tractopelle. Le chargeur soulève les matériaux de l'andain et les déverse à nouveau, mélangeant ainsi les matières et remettant le mélange sous forme d'un andain plus aéré. Le chargeur peut mélanger les matières se trouvant à la base de l'andain avec celles du haut, formant ainsi un nouvel andain à proximité de l'ancien. Afin de minimiser la compaction, l'opération doit s'effectuer sans rouler sur l'andain. Les andains, retournés avec un chargeur, sont souvent construits par paires assez serrées et sont ensuite rassemblés une fois que les andains auront diminué de volume.

Les andains sont aérés essentiellement par un mouvement passif ou naturel de l'air (*convection et diffusion gazeuse*). Le taux d'échange avec l'air et la taille du tas dépendent de la porosité de l'andain. Quand l'andain est trop grand, des zones anaérobies apparaissent à proximité du centre. Des odeurs sont libérées quand l'andain est retourné. Par contre, les petits andains perdent rapidement de la chaleur et risquent de ne pas réussir à atteindre une température suffisamment élevée pour permettre l'évaporation de l'eau et l'élimination des pathogènes.

5.4.2.2 Biotertre

La technique consiste à réaliser des tas plus importants au sein duquel circule l'air de manière forcée. Un émottage préalable des terres est parfois nécessaire.

La terre est déposée sur un soubassement aérant. Des drains d'extractions sont également placés pour récupérer l'air vicié. L'air récupéré est traité via des bio-filtres et/ou des filtres à charbon actif.

La terre peut être irriguée si nécessaire afin de maintenir sa teneur en eau.

Cette technique qui nécessite une surface d'environ 2/3 du volume en place, permet de réduire les coûts d'évacuation de 40 à 60%.

5.4.2.3 Phytoremédiation

La phytoremédiation est une technique qui regroupe toutes les technologies à base de plantes, d'algues (*phycoremédiation*) ou de champignons (*mycoremédiation*) qui permettent de transformer, dégrader, concentrer ou volatiliser les polluants de l'eau et de l'air utilisant des plantes vasculaires. La dégradation de composés nocifs est accélérée par l'activité microbienne.

Il convient d'utiliser les végétaux les plus aptes au milieu, aux polluants présents et à leur taux de récupération.

Elle correspond à divers mécanismes souvent très complexes :

- La **phytostabilisation** ou **phytoconcentration** consiste à immobiliser les polluants par fixation dans les systèmes racinaires des plantes. Cette technique est principalement utilisée pour les sols lourdement contaminés.
- La **phytoextraction** ou **phytoaccumulation** consiste transférer les polluants vers les parties aériennes des végétaux dits plantes hyperaccumulatrices. Cette technique est généralement utilisée pour des sols moyennement contaminés en métaux lourds (*Zn, Cd, Pb, Ni, Cu, Co et Mn*). Certaines plantes peuvent accumuler plus de 1 000 mg de Cu et Co/kg de matière sèche mais de grandes variations peuvent exister au sein d'une même espèce. Ces variations peuvent être expliquées par les nombreux paramètres du sol. Par la suite, certains végétaux peuvent être utilisés comme catalyseurs en chimie organique industrielle après une purification minimale (*traitement thermique, traitement acide et*

filtration, etc.). Des études comme le projet Solmetplant sont en cours pour mieux comprendre les mécanismes (Lange et al., 2015).

- La **phytovolatilisation**
- La **phytodégradation** consiste à détruire ou transformer biologiquement des contaminants sous l'action métabolique des plantes.
- La **phytotransformation** consiste à transformer les contaminants en éléments utilisés par d'autres organismes.

Cette technique s'applique essentiellement aux phases solides du sol situées principalement dans le premier mètre (*domaine d'investigation des racines*). Elle concerne majoritairement les métaux lourds et les hydrocarbures.

5.4.3 Traitement par séparation physico-chimique

Il est assez fréquent d'observer que les polluants s'attachent généralement à certaines fractions du sol. Ainsi, en séparant ce dernier en différentes phases de granulométrie, de densité et/ou de propriétés chimiques de surface différentes selon des techniques similaires à celles du traitement des granulats (*spirale, hydrocyclone, flottation, filtration, ...*), il est possible de concentrer la pollution dans une fraction (*généralement fine*) et de libérer une fraction plus ou moins saine.

Dans ce cadre de technique, le type de polluant n'est pas un frein. C'est la répartition du polluant sur les particules de sol qui détermine si la technique est envisageable ou pas. Dans la plupart des cas, les sols sableux sont facilement traitables (*meilleur rendement à la sortie*) que les sols argileux.

Le dispositif de séparation par voie physique n'est généralement pas simple à concevoir.

5.4.3.1 Lavage par voie physique

La technique la plus fréquente consiste à séparer les différentes fractions granulaires avec l'aide de l'eau. Les principaux (*séparation des agrégats, séparation des limons, argiles et graviers*).

- La **partie polluée généralement fine** (riche en polluants) est alors floculée et passé à l'épaississeur ou à la presse avant d'être envoyé vers des centres d'enfouissement.
- La **partie saine** est séchée avant une réutilisation éventuelle.

Les circuits d'eau et d'air sont en circuit fermé afin de pouvoir recycler l'eau et récupérer les éléments volatils.

5.4.4 Traitement chimique

5.4.4.1 Processus de cimentation

La technique consiste à mélanger le sol à un ciment particulier qui réagit avec du CO₂ injecté pour piéger chimiquement et physiquement les polluants. Ce ciment réagit plus facilement avec le CO₂ qu'avec l'eau.

Le matériau contaminé est placé dans un broyeur concasseur pour y être homogénéisé avant d'être mélangé au ciment dans un deuxième broyeur concasseur. Le produit résultant est ensuite introduit dans une chambre rotative de carbonatation en même temps que le CO₂ est injecté. La réaction est relativement rapide et le produit final peut être ainsi rapidement valorisé.

Le dispositif peut être adaptable au site et au type de pollution.

5.4.4.2 Technique de phosphatation / carbonatation (*Sédisol*)

La **technique de phosphatation / carbonatation** connue sous le nom de procédé **Novosol®** (Solvay) consiste à piéger les **métaux lourds** dans la structure cristalline des phosphates de calcium [(Ca₃(PO₄)₂).H₂O] formés par ajout de H₃PO₄ (*réduction de l'impact sur l'environnement*) et à détruire les composés organiques par calcination (650-900°C). Cela permet de réduire drastiquement la lixiviation de tels matériaux. L'usine SEDISOL de Farciennes (Belgique) permet de traiter 235 000 m³ de sédiments par an.



Figure 5.1 – Schéma du procédé NOVOSOL® (Solvay).

5.4.5 Traitement par voie thermique ou désorption thermique

Le principe consiste à porter les terres à une température élevée (*max.* 600°C) où l'oxydation provoque la rupture des forces d'adhésion des polluants au sol. Les polluants sont alors transformés en gaz et sont incinérés (*max.* 1 200°C)

Cette technique s'applique principalement aux polluants organiques tels que les huiles minérales, les graisses, essences, les BTEX, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les phénols, les composés organochlorés et les cyanures.

Parmi les procédés commercialisés, il convient de citer :

- Le **procédé TRI® (ATM)** consiste à sécher préalablement le sol homogénéisé dans un tambour de séchage ($T^{\circ} : \pm 150^{\circ}\text{C}$ et durée : 5 - 7 minutes) avant de le brûler dans un tambour de calcination par chauffage direct ($T : 450 - 650^{\circ}\text{C}$ et durée : 15 - 25 minutes) afin de transformer les polluants en vapeur et gaz (*phase de décontamination*). Les particules solides sont par la suite refroidies à 50°C dans un bassin d'eau (*refroidisseur de terres*) avant d'être passées au crible. Le gaz est récupéré par aspiration vers un brûleur de post-combustion ($T : 850 - 1\ 200^{\circ}\text{C}$ et durée : 2 secondes) où les polluants sont décomposés pour donner des matières inertes. Les fumées sont ensuite rapidement refroidies au moyen d'échangeurs de chaleur ($T^{\circ} : 250^{\circ}\text{C}$) afin d'éviter la recombinaison des dioxines avant d'être conduites vers un filtre électrostatique où les poussières sont éliminées. La chaleur récupérée sert à fournir partiellement la température des tambours. Les impuretés acides (SO_2 , HCl , HCN , HF , mercure) sont éliminées par pulvérisation de lait de chaux dans un réacteur à chaux. Une majorité des particules de chaux est ensuite séparée dans un cyclone pour circuler à nouveau dans le réacteur à chaux. Du charbon actif peut être injecté à la sortie pour éliminer plus efficacement certaines impuretés spécifiques (*mercure, dioxines/dibenzofuranes*). Les fumées passent ensuite à travers un filtre à manches avant d'être relâchées dans l'atmosphère. Les résidus du filtre à manche (*poussières, chaux, charbon actif*) sont récupérés et traités à part. Ce dispositif permet de traiter 30 à 90 tonnes par heure.

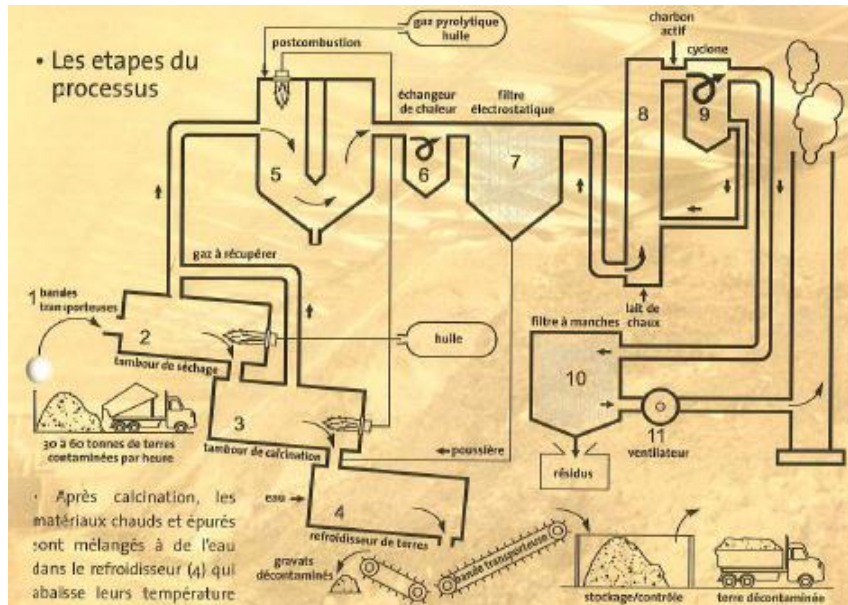


Figure 5.2 – Schéma du processus TRI® (ATM).

- Le dispositif THERMOPILES de la société Deep Green permet de récupérer une partie de l'énergie du sol polluée pour faire fonctionner le dispositif. Ce dispositif est à installer sur site.

5.4.6 Inertage

Un certain nombre de métaux lixiviabiles sont stabilisés par l'ajout d'un liant dans une centrale. Cette technique nécessite une étude de faisabilité et permet de réduire les coûts d'évacuation de 20 à 30%.

5.4.7 Valorisation des terres traitées ou inertes

Après traitement et analyses, les terres dites décontaminées soit retournent sur le site, soit sont utilisées à d'autres applications.

5.5 TRAITEMENT SUR SITE

5.6 TRAITEMENT IN SITU

5.6.1 Méthodes par extraction ou injection d'une substance

5.6.1.1 Bioremédiation (activité biologique)

Cette méthode consiste à injecter dans le sol, de l'air ou du peroxyde ainsi que des nutriments et des bactéries afin que ces dernières puissent se développer et consommer la pollution en modifiant les polluants en H₂O, CO₂ et autres sous-produits non toxiques.

Cette technique s'applique aux différents types d'hydrocarbures

Cette technique est réalisée conjointement au traitement de la nappe.

Il s'agit d'un système d'injection prenant en compte la dispersion verticale gravitaire.

5.6.1.2 Venting (extraction d'air)

Le venting est un procédé in situ permettant d'extraire les composés organiques volatils (solvants chlorés, essences, BTEX, ...) de la zone non saturée (phase pure, gazeuse et dissoute dans l'eau interstitielle). Cette technique consiste à mettre en dépression la zone non saturée et à induire des circulations d'air centrées sur et en direction de chaque point d'extraction.

Le renouvellement de l'air dans les pores du sol a pour conséquences la modification des équilibres chimiques entre les différentes phases présentes. Ainsi, au cours de son passage à travers la zone contaminée, l'air se charge de contaminants. Ces vapeurs sont récupérées dans les points d'extraction sous vide et éventuellement traitées en surface. Ces composés peuvent alors être détruits (brûleur, oxydation catalytique) ou transférés sur un autre milieu (condenseur ou charbon actif).

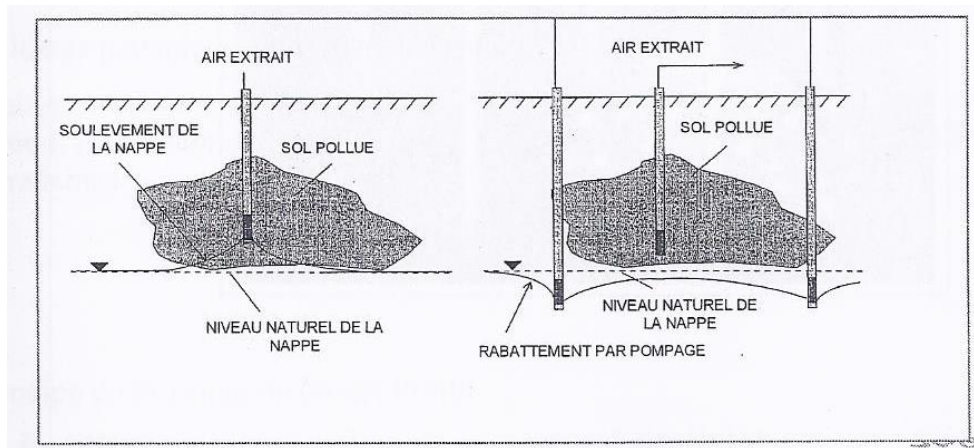


Figure 5.3 – Quelques modèles de venting. A gauche) utilisé comme solution unique et à droite) en combinaison avec du pump and treat.

5.6.1.3 Bioventing (extraction d'air + activité biologique)

Le bioventing est un procédé *in situ* permettant d'aérer la zone insaturée par apport d'oxygène gazeux afin que les micro-organismes du sol puissent mieux respirer et dégrader les polluants. La méthode comporte une combinaison de la technique du venting et un apport d'oxygène stimulant la biodégradation.

Cette technique aérobie permet de traiter les produits biodégradables semi volatils.

5.6.1.4 Sparging (injection d'air)

Le *sparging* ou *air sparging* consiste à injecter de l'air en dessous du niveau de la nappe souterraine à traiter via des puits (*verticaux ou horizontaux*). L'air se propage à travers la zone saturée en créant des canaux d'air. En instaurant cette interface air - phases du sol (*eau, sol, polluant*), le *sparging* favorise la volatilisation des substances chimiques volatilisables présentes dans la zone saturée ainsi que celles présentes à l'état pur au-dessus de la frange capillaire aqueuse.

Cette technique permet de traiter les polluants volatils situés localement dans la zone saturée (*dissoute, adsorbée*).

L'air *sparging* est souvent couplé à un réseau de récupération des vapeurs installé dans la zone non saturée. Les vapeurs peuvent être ensuite traitées en surface.

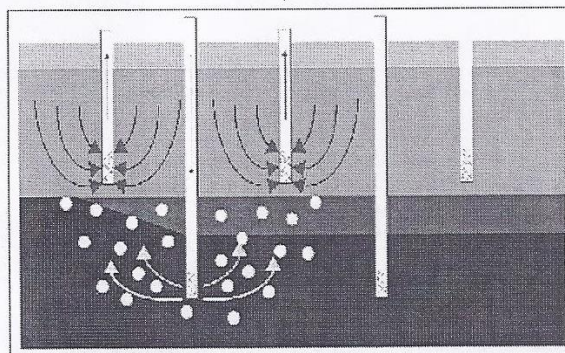


Figure 5.4 – Principe du sparging.

5.6.1.5 Biosparging (injection d'air + activité biologique)

Le *biosparging* consiste à injecter de l'air dans la zone saturée afin de permettre la volatilisation des éléments contaminants et le départ vers la surface. De plus, l'oxygène de l'air dissout dans la phase aqueuse permet d'augmenter la biodégradation aérobie de certains polluants.

Le biosparging permet d'éliminer les polluants biodégradables présents dans la zone saturée.

5.6.1.6 Flushing (injection d'un fluide)

Le *flushing* ou lavage *in situ* consiste à créer un mouvement de fluide à travers la zone contaminée par injection d'un fluide. Lors de son passage, le fluide se charge en contaminant et est aspiré vers la surface pour y être traité avant d'être éventuellement réinjecté.

Certains additifs peuvent être ajoutés au fluide afin d'accélérer la mobilité des contaminants et/ou d'augmenter le rendement d'extraction. Ces produits améliorent la solubilisation des contaminants dans

l'eau, la formation d'une émulsion eau/contaminant et produisent une réaction chimique avec le contaminant.

Cette technique permet de dépolluer les polluants solubles présents dans la zone insaturée du sol.

5.6.1.7 Oxydation (*injection d'oxydants*)

L'oxydation est un procédé qui consiste à injecter des oxydants dans les zones saturées et non saturées tels que les peroxydes, les permanganates et de l'ozone. Le succès de la technique dépend de la capacité de diffuser l'oxydant à travers la zone polluée.

Le **procédé ISCO** (*In Situ Chemical Oxydation*) est un procédé d'oxydo-réduction qui est essentiellement un échange d'électron. Les liens de carbones sont brisés et les composants organiques sont ainsi complètement détruits ou changés en des composants plus petits moins dangereux.

Ce procédé rapide permet de traiter une large variété de composants organiques, les volatils halogénés et non halogénés, les semi-volatils, les PCB's, les pesticides et les cyanides.

5.6.1.8 Injection de vapeur

L'injection de vapeur permet de désorber et d'évaporer les polluants présents. La vapeur est injectée via des puits à la température d'ébullition de l'eau sous la zone à traiter. Idéalement, l'ensemble de la zone à traiter est amené à la température d'ébullition de l'eau à pression locale. Le fluide récupéré (*vapeur condensée + polluants*) est repris par les filtres d'extraction et est traité en surface. Si la technique n'est pas bien appliquée ou sous contrôle, il y a un risque de dispersion des polluants qui sont devenus plus mobiles.

La technique est efficace pour tous les polluants organiques peu solubles dans l'eau. La technique est néanmoins limitée par la perméabilité du sol. Un sol peu perméable et fort hétérogène réduit l'efficacité de la technique.

5.6.2 Méthodes par injection d'autres facteurs

5.6.2.1 Traitement thermique in situ (*chaleur*)

Cette technique consiste à élever la température dans le sol afin de transférer les éléments polluants depuis le sol vers une phase gazeuse qui est pompée et récupérée en surface pour y être traitée. Il ne s'agit pas d'une incinération.

5.6.2.2 Electrical Heating (*courant électrique*)

Le principe consiste à chauffer par divers procédés basés sur un apport électrique. Le chauffage par résistances électriques (*joule*), par micro-ondes est utilisé pour réaliser la remédiation.

Le chauffage a deux objectifs :

- Favoriser la désorption des contaminants fortement sorbés sur les particules du sol.
- Augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de pouvoir les volatiliser et les extraire en phase gazeuse.

Cette technique est toujours accompagnée d'une récupération des vapeurs émises durant le procédé. Ces vapeurs sont traitées après extraction (*oxydation catalytique, charbon actif, ...*).

Cette technique traite les polluants hors nappe. Les polluants traités sont volatils mais en l'occurrence, ils peuvent l'être moins que dans le cas du venting.

5.6.3 Techniques de confinement

5.6.3.1 Isolation verticale

L'*isolation verticale* consiste à réaliser autour du massif pollué, un dispositif vertical étanche afin de confiner la pollution dans cette zone.

Parmi les techniques les plus fréquemment utilisées pour élaborer ce dispositif, il convient de citer :

- Les *murs emboués* ou *parois moulées*
- Les *palplanches*
- Les *piles et les forages par jet-grouting*

5.6.3.2 Isolation horizontale

L'*isolation horizontale* consiste à réaliser à confiner la pollution dans une couche spécifique via un dispositif étanche vis-à-vis des autres couches.

Parmi les techniques les plus fréquemment utilisées pour élaborer cette étanchéité, il convient de citer :

- Une *couche d'argile*
- La *mise en œuvre d'une géomembrane de type HDPE*
- Un *mélange sable - ciment*

5.6.3.3 Barrières sélectives/ réactives

Ce procédé consiste à utiliser des réactifs afin de réduire les contaminants généralement au moyen de réactions d'oxydoréduction.

Afin de constituer la barrière réactive, un mélange de limaille de fer et de matériaux inertes remplit une tranchée à une profondeur permettant à l'eau de la nappe phréatique de traverser le mur souterrain ainsi construit. Au cours du passage à travers la barrière, les contaminants dissous dans l'eau de la nappe entrent en contact avec les matériaux réactifs et sont réduits. La tranchée peut être terrassée jusqu'à un niveau imperméable.

Cette technique permet de traiter les nappes phréatiques polluées par des composés solubles et principalement les composés chlorés mais aussi certains métaux (*As, U, Cr*).

Plusieurs types de barrières sélectives existent :

- La *barrière de type "Funnel & Gate"* est constituée d'une alternance de parois en palplanches et de portes réactives par lesquelles passe l'eau. Des réseaux de drainage situés de part et d'autre du dispositif permettent une meilleure circulation de l'eau à traiter et une meilleure évacuation de l'eau traitée.

5.6.3.4 Solidification

Les méthodes de solidification sont des techniques d'inertage de l'ensemble de la matrice contaminée. Les caractéristiques physiques de la zone polluée sont ainsi modifiées afin de réduire l'accès physique des fluides du sol au contaminant. Il s'agit principalement de réduction de perméabilité.

Ces techniques permettent de traiter la phase solide du sol et la plupart des polluants. Le choix de la méthode de solidification varie selon le polluant, l'environnement et les coûts de mise en œuvre.

- La *vitriification* correspond par exemple à une solidification thermique.

6. QUELQUES SOLS WALLONS PARTICULIERS

6.1 SOLS ARGILEUX

Les principaux terrains argileux présents en Wallonie sont les suivants (du plus jeune au plus vieux).

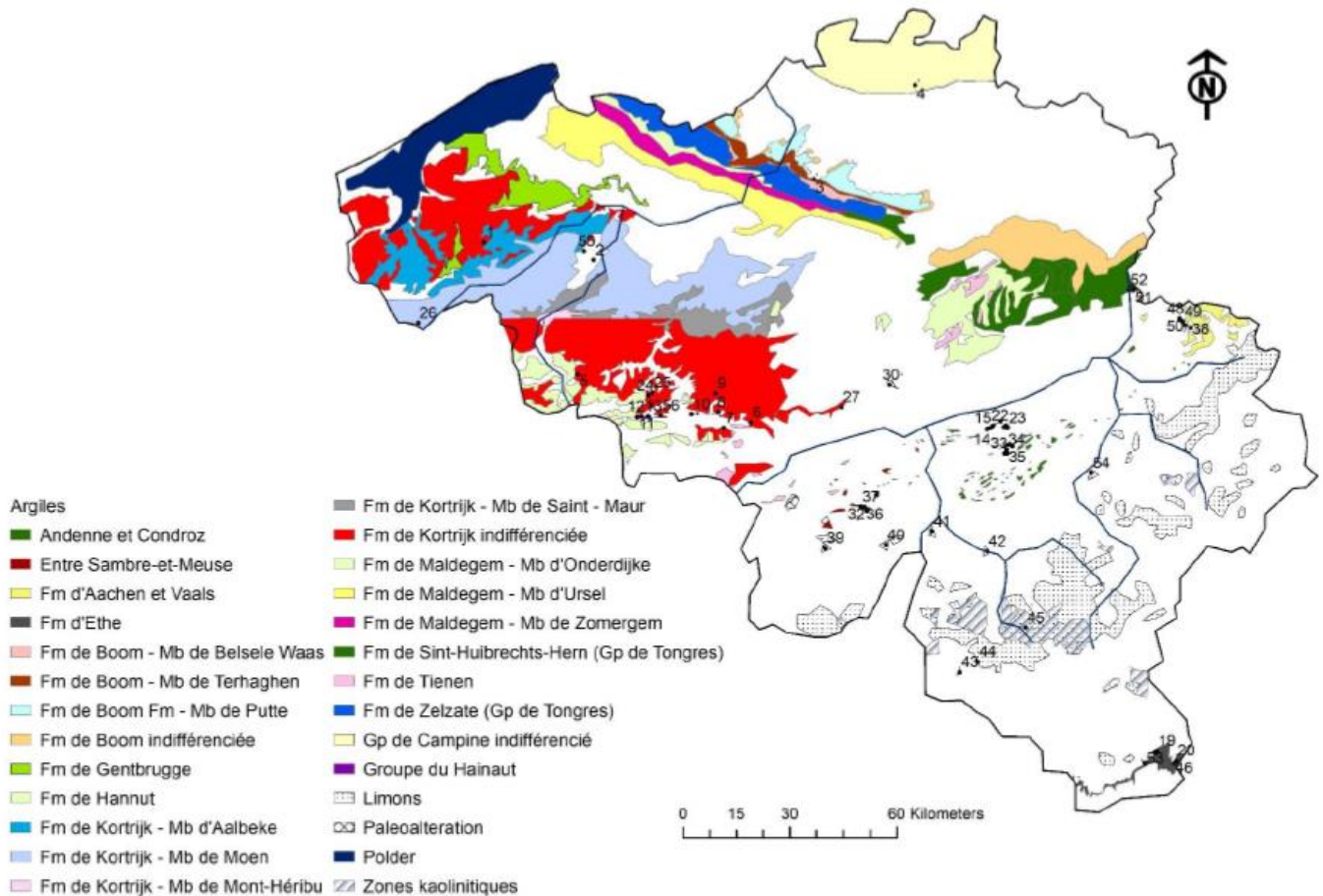


Figure 6.1 : Répartition des principaux sols argileux en Belgique (Source : Mango-Itulamy L. A. (2019)).

6.1.1 Argiles du Condroz et d'Andenne (Miocène – 3,6 Ma)

Ces argiles plastiques sont localisées dans des paléokarsts formés dans les terrains carbonatés du Givétien, du Tournaisien et du Viséen de la région comprise entre Andenne et Dave.

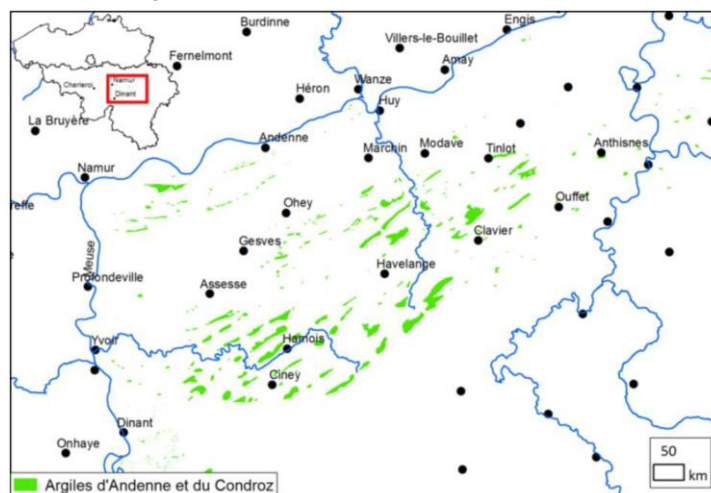


Figure 6.2 : Répartition des argiles du Condroz et d'Andenne (Source : Rekk (2014)).

Ces poches de dissolution pouvant atteindre 100 m de profondeur représentent d'anciens lacs karstiques qui ont été colmatés au Miocène par les produits d'altération des terrains schisteux environnants. Ces gisements sont très irréguliers et composés de sables, d'argiles et de lignite. Dans le Condroz, ils ont été généralement exploités par puits et galeries pour en faire des poteries, de la céramique et des produits réfractaires. L'activité extractive a débuté à la fin du Moyen âge et a cessé dans les années 1960.

La campagne de reconnaissance comporte la consultation des documents (*cartes géologiques et pédologiques, archives, etc.*), la réalisation de pénétromètres (*dynamique ou statique*), de forage à sec avec prise d'échantillons. Des tomographies peuvent être réalisés en cas de doute sur la présence d'exploitation minière souterraine.

6.1.2 Argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse (Miocène - 3,6 Ma)

Ces argiles occupent également les poches de dissolution situées dans les bandes calcaires du Dinantien et du Dévonien.

Les principaux gisements (*Hanzielle, Florennes, Silenrieux, Matagne, Oret, Bioul, Biesme, Morialmé, Onhaye, Saint-Aubin, etc.*) ont été exploités dans les carrières ouvertes pour l'argile plastique et les sables divers y associés. Ces matériaux servaient à la production de poterie, de grès, de la céramique, de la faïencerie et des produits réfractaires pour la métallurgie et la verrerie. Leur hétérogénéité empêche cependant leur mise en valeur.

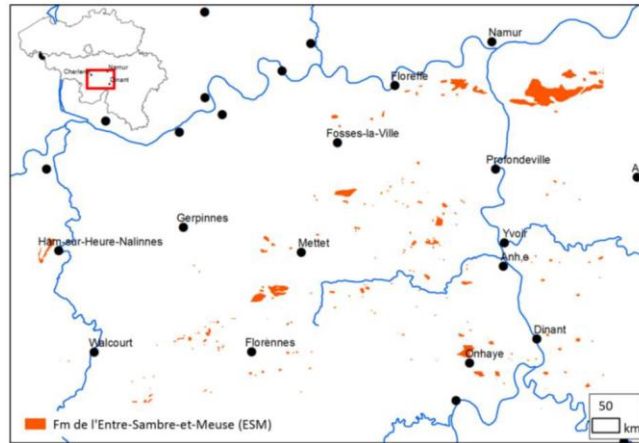


Figure 6.3 : Répartition des argiles de l'Entre-Sambre-et-Meuse (Source : Rekk (2014)).

La campagne de reconnaissance comporte la consultation des documents (*cartes géologiques et pédologiques, archives, etc.*), la réalisation de pénétromètres (*dynamique ou statique*), de forage à sec avec prise d'échantillons. Des tomographies peuvent être réalisés en cas de doute sur la présence d'exploitation minière souterraine.

6.1.3 Argiles du Groupe de Landen (Paléocène supérieur - 59 Ma)

Ces argiles sont en réalité d'un mélange de gravier, de sable, d'argile sableuse et de cailloutis. Elles regroupent les Formations de Hannut et de Tienen et sont présentes dans le Hainaut et en Hesbaye (*région d'Hannut*).

Ces terrains ont été exploités pour la fabrication de briques.

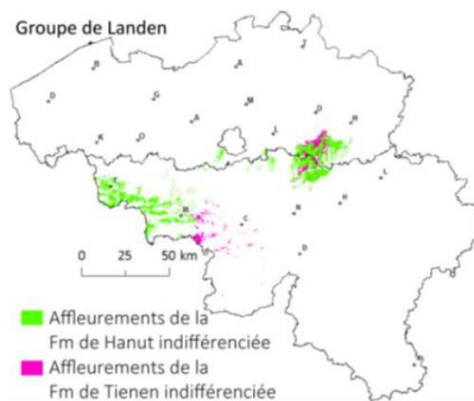


Figure 6.4 : Répartition des argiles du Groupe de Landen (Source : Rekk (2014)).

La campagne de reconnaissance comporte la consultation des documents (*cartes géologiques et pédologiques, archives, etc.*), la réalisation de pénétromètres (*dynamique ou statique*), de forage à sec avec prise d'échantillons.

6.1.4 Argile gonflante de la Formation de Vaals ou smectite de Herve (Secondaire - Crétacé : 85 Ma)

La Formation de Vaals anciennement connue sous le nom de smectite de Herve présente dans la région située à l'Est de Liège, est composée des deux formations suivantes de haut en bas :

- Une *siltite grise sableuse glauconifère* ;
- Un mélange d'argile gonflante verdâtre glauconifère (*smectite de Herve*) et de craie argilisée avec localement des niveaux indurés, graveleux, d'argile glauconifère décalcifiée et du sable vert.

Ces terrains se caractérisent non seulement par des risques de gonflement ou de retrait avec développement de fissures sur les abords de la voirie qui ont tendance à se propager vers l'intérieur de l'ouvrage selon la teneur en eau du sol mais aussi par des phénomènes de glissement y associés.

Il est donc important de déterminer les caractéristiques (*géométriques et comportement*) du sol.

La campagne de reconnaissance consiste en la réalisation de pénétromètres (*dynamique ou statique*), de forage à sec avec prise d'échantillons pour essais de gonflement en éprouvette ou essais de retrait. L'échantillonnage et la conservation doivent être la plus adaptée possible pour éviter toute modification des caractéristiques du matériau. L'altération modifie peu l'angle de frottement interne mais fortement la cohésion.

6.1.5 Argiles d'Aix-la-Chapelle (*Secondaire - Crétacé : 85 Ma*)

6.1.6 Argiles du Groupe du Hainaut (*Secondaire - Crétacé : 88 Ma*)

6.1.7 Argile d'Ethe et d'Arlon (*Secondaire - Jurassique : 190 Ma*)

6.1.8 Argile d'altération des massifs schisto-gréseux (*Primaire : > 250 Ma*)

6.1.9 Dépôts de kaolinite

La kaolinite présente localement en Ardennes sur de grandes épaisseurs (*jusqu'à 80 m*). Elle gonfle en présence d'eau, de sulfate.

6.2 SOLS LIMONEUX

6.2.1 Limon éolien (læss)

Le limon éolien un limon légèrement calcaire (0-10 %) lié à l'action du vent. Il recouvre une majorité de la Flandre et de la Wallonie située au nord du sillon Sambre-et-Meuse comme notamment la Hesbaye. Sa particularité est d'être souvent décalcifié ou lessivé en surface suite au lessivage et à la percolation verticale des eaux. Il tient donc par habitude.

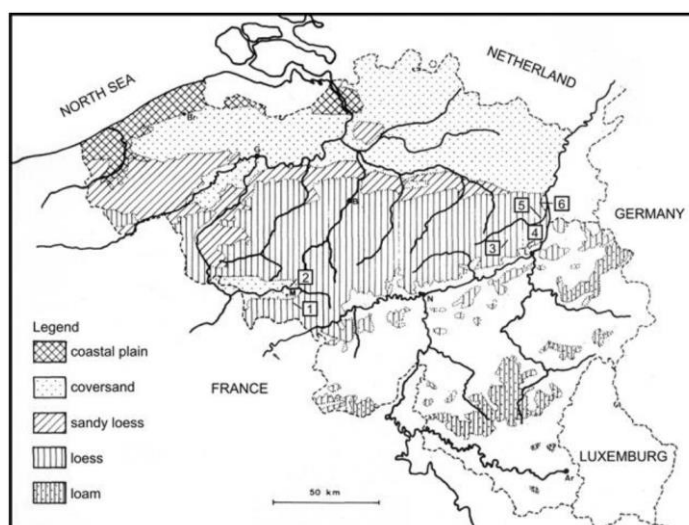


Figure 6.5 : Répartition des limons éoliens en Belgique (*Bogemans : 2017*).

De plus, ce limon est également appelé terre à briques car il a fait l'objet d'une exploitation. Au total, environ 400 exploitations ont été recensées, parfois jusqu'à 10 m de profondeur. Cela concerne principalement la Flandre Orientale.

La campagne de reconnaissance consiste en la réalisation de pénétromètres (*dynamique ou statique*) et de forage et de sondages accessibles en vue de réaliser des essais d'identification, de détermination du cohésion et d'angle de frottement (*pente de talus*) et d'étude de traitement de sol. La présence d'une nappe phréatique est importante à déterminer.

6.3 SOLS SABLEUX

6.3.1 Sable décalcifié

Le sable décalcifié est un sable qui a perdu par altération et dissolution dans l'eau, sa teneur en carbonates. Il peut alors avoir plusieurs comportements. Soit, il y a apparition de vide, soit la structure tient par "habitude". Toutefois, à la moindre modification de paramètres (*un terrassement, par exemple*), il perd sa structure et donc toute résistance.

6.3.1.1 Sable bruxellien

Cette formation présente à l'Est de la vallée de la Senne comporte principalement des bancs de sable calcaire (0-48 %) présent principalement dans la matrice.

Les principaux problèmes sont :

- Une *perte de la structure par décalcification de la matrice carbonatée* génère des formes de cheminées protégées par un certain "effet silo" qui joue un effet positif dans certains travaux de terrassement ;
- La *présence de nombreuses intercalations dures* (pierre calcaire et concrétions ferrugineuses) qui constituent des points durs (*refus d'avancement ou déviation importante du pénétromètre, forage et pieux*).

Les moyens de reconnaissances les plus adaptés sont le pénétromètre statique avec dispositif de recoupement des niveaux indurés et la gravimétrie. De plus, il importe de vérifier les caractéristiques hydrogéologiques du massif.

6.3.2 Sable boulant

Le sable boulant est un sable fin qui perd toute consistance en présence d'une certaine quantité d'eau.

6.3.2.1 Formation d'Aachen

Cette formation présente dans la région à l'Est de Liège comporte une alternance de couches de sable fin et de couches d'argile silteuse et sableuse.

Ces couches d'argiles peuvent favoriser le développement de nappes captives dans les couches sableuses. Ces sables présentent une faible perméabilité et un comportement bouillant qui est particulièrement marqué en cas de terrassement (*déblais*) dans ces niveaux.

La campagne de reconnaissance doit comporter des essais de pénétromètre (*dynamique ou statique*) pour notamment détecter les niveaux argileux, des forages et des sondages accessibles avec prise d'échantillons pour pouvoir réaliser des essais en laboratoire d'identification, de comportement vis-à-vis de l'eau et de traitement.

Dans le cas d'un déblai, il peut être nécessaire de réaliser des masques drainants en talus afin de faciliter l'évacuation d'eau. Par contre, sa réutilisation comme matériau de remblai est délicate en raison de sa grande sensibilité à l'eau. Un traitement à la chaux peut être envisagé.

6.4 SOLS ROCHEUX

6.4.1 Craie et tuffeau

La craie et le tuffeau sont des roches formées principalement de coccolithes (+ *sable pour le tuffeau*) et très poreuses (*jusqu'à 45 %*) ; ce qui influence fortement la perméabilité. Elles sont présentes dans la région de Mons et de Visé (*formation de Gulpen*). Leur résistance est liée d'une part aux différents ponts calcaires entre les coccolithes et d'autre part, à la pression capillaire présente dans les pores. Il existe deux types d'altération qui peuvent donner lieu à des paléokarsts au sommet :

- L'*altération chimique* se traduit par des phénomènes de dissolution et de précipitation de la roche. Elle dépend principalement de la teneur en CO₂ et de l'acidité de l'eau de pluie ;
- L'*altération mécanique* se caractérise par une décomposition de la structure liée souvent à un changement trop brutal des conditions du milieu (*pression interstitielle*) qui peut éclater les ponts calcaires. Cela se produit principalement en hiver (*cycle gel – dégel*) et si des engins lourds circulent.

La campagne de reconnaissance comporte des essais au pénétromètre dynamique ou statique, des forages à souvent à sec avec prise d'échantillons pour réaliser des essais en laboratoire d'identification et de comportement (*cohésion et angle de frottement*). Il importe de déterminer les circulations d'eau, la perméabilité et la présence d'anciennes exploitations souterraines.

REMARQUE : Le mode de prélèvement exerce une grande influence sur le comportement mécanique des échantillons en laboratoire car des fissures peuvent apparaître et favoriser certains cheminements.

6.4.1.1 Formation de Gulpen (Crétacé)

La formation de Gulpen présente dans la région à l'Est de Liège est composée des 4 formations suivantes de haut en bas :

- Une *argile rousse riche en silex* (anciennement dénommée *conglomérat à silex*) issue de la dissolution et du lessivage des formations supérieures, se caractérise par une épaisseur (de l'ordre de 20 m) et des caractéristiques géotechniques très variables ;
- Une *craie karstifiée* se caractérise également par une épaisseur et des caractéristiques géotechniques variables ;
- Une *craie blanche à beige* contenant quelques silex noirs au sommet est souvent peu indurée, voire altérée en argile blanche à grise. Son épaisseur varie de 10 à 20 m selon les endroits. Elle a généralement de faibles caractéristiques géotechniques ;
- Une *craie glauconifère* verdâtre a une épaisseur métrique et constitue la base de la formation.

6.4.2 Marne gypseuse

La marne gypseuse contient du gypse saccharoïde plus ou moins dissous ; ce qui présente des variations de compacité de couche et augmente le risque d'avoir des vides. Cette dissolution s'explique par le fait que la marne est riche en argile, donc peu perméable et souvent saturée avec un risque d'avoir une nappe captive en dessous de la couche. L'eau remonte à travers les fissures et dissout le gypse qu'elle rencontre, développant ainsi un réseau d'écoulement souterrain.

La campagne de reconnaissance doit comprendre des forages destructifs avec diagraphies directes et tomographies électriques et électromagnétiques ainsi que des pressiomètres.

6.4.3 Schiste-carton

Le schiste-carton (*Toarcien*) présent dans le Sud de la Belgique apparaît souvent comme un massif assez fracturé selon deux réseaux de diaclases. La perméabilité de fissure y est importante et favorise de ce fait, le gonflement et l'écartement des différents fins niveaux. La vitesse et la profondeur d'altération dépendent notamment des teneurs initiales en sulfure, carbonate et silice de la roche de départ (*protolithé*).

REMARQUE : Il est interdit de poser des scories sur ce type de terrain (*certaine teneur en sulfates*) au risque de voir une forte altération.

De plus, le gypse peut se former à partir de la pyrite et générer un gonflement (*entre 11 et 30 %*) qui s'accélère en présence de chaleur. Il importe d'éviter toute modification de température.

La campagne de reconnaissance comporte des forages à sec (*gonflement au contact de l'eau*).

7. SOLS PEDOLOGIQUES ET AUTRES DEPOTS RESIDUELS

L'altération d'une roche située à proximité de la surface (*milieu instable*) produit différentes particules minérales dont une partie quitte le milieu, soit via l'eau (*particules solubles*), soit via des moyens mécaniques (*vent, eau, glaciers, etc.*) et l'autre partie reste sur place pour donner lieu à un *dépôt résiduel*.

La faune et la flore qui s'y développent, produisent de la matière organique qui, après décomposition en chélates, réagit avec les particules minérales pour former des complexes.

REMARQUE : La plupart du carbone présent dans l'écosystème terrestre est concentré dans la partie superficielle des sols. Dans le contexte environnemental actuel, la minéralisation du carbone augmente avec l'élévation de la température.

7.1 SOLS OU ELUVIUM

7.1.1 Définitions

- Un *sol* se définit comme une *formation superficielle en place ou un écosystème constitué d'un mélange de particules minérales issues de l'altération physico-chimiques et biologiques d'une roche parentale, de matières organiques appelés humus ainsi que d'air et d'eau (pédogénèse)*. La profondeur de l'interface sol - roche mère est irrégulière. Elle varie entre 0 et 30 mètres et dépend du climat, de la nature de la roche mère, de la présence de discontinuités ainsi que de la vitesse d'évacuation des débris. L'altération progresse toujours vers le bas jusqu'à présence d'un certain équilibre ;
- Un *paléosol* est un *sol formé dans le passé dans des conditions souvent différentes des actuelles et qui a été enfouis par la suite sous les sédiments*. Ainsi, certains paléosols ardennais se sont formés durant le Tertiaire sous un climat chaud et humide, analogues aux climats intertropicaux actuels. Il peut servir, dans certains cas, de roche mère (*argile à silex, terra rossa*).
- L'*humus* est le produit de décomposition de la matière organique issue de la faune et de la flore par une armée de microorganismes en molécules organiques. Il se présente sous forme d'un mélange complexe de matière organique amorphe brune qui se présente à l'état de colloïdes. Quatre types d'humus existent en fonction de leur aptitude à libérer rapidement ces éléments.
 - *Le mull ou humus doux* est un humus plutôt basique à décomposition rapide, peu épais et caractéristique d'un sol riche en forêt de feuillus sous climat tempéré et de prairie établie sur roche calcaire ;
 - *Le mor ou humus brut* est un humus très acide (*roche cristalline, sable siliceux*) en présence d'une végétation pauvre en azote (*conifères, bruyères*) à minéralisation lente. Il est épais et caractérise un sol sous forêt de résineux ou sur sable sous les climats froids ou très pluvieux ;
 - *Le moder* est un humus intermédiaire entre l'humus doux et l'humus brut ;
 - *La tourbe* est un humus se formant en milieu saturé en quasi-permanence d'eau et privés d'air.

7.1.2 Composition et description

Dans un sol, les particules solubles et l'humus sont mélangés et déplacés par l'eau de percolation. Il en résulte une différenciation du milieu en couches superposées appelées *horizons* dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres.

En théorie, la succession des horizons est de haut en bas, la suivante :

- La *couche organique O* est principalement composée de feuilles et de débris organiques en début de décomposition ;
- L'*horizon A* appelé *horizon de lessivage, horizon éluvial* ou *éluvium* est un niveau très lessivé contenant principalement de la matière organique en décomposition (*humus*) et peu de matière minérale (*grains de quartz et d'argile de taille d'un limon et quelques fragments de la roche non complètement altérée*). Il est parfois subdivisé en 2 sous-horizons :
 - L'*horizon A₁* est riche en matière organique ;
 - L'*horizon A₂* est pauvre en matière organique.
- L'*horizon B* appelé *horizon d'accumulation* ou *horizon illuvial* est le niveau d'accumulation des particules minérales (*insolubles et secondaires*) et de l'humus. Il peut être subdivisé en sous-horizons B₁, B₂ et B₃ ;

- L'*horizon C* ou *horizon d'altération* correspond à la roche mère en cours de décomposition.

Selon l'importance des agents de dégradation des roches et leur efficacité, l'altération peut aller d'un simple enduit superficiel (*lithosol*) à un complexe d'altération peu évolué (ex. *arène granitique*), voire un véritable sol structuré en horizons de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

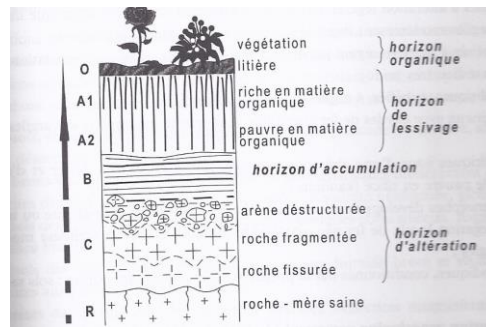


Figure 7.1 – Principaux horizons d'un profil de sol (Source : Chamley – 2002).

7.1.3 Classifications

Il n'existe pas de classification universelle pour ranger la grande diversité et nomenclature des sols. Cela s'explique par la multitude des facteurs régissant le sol (*végétation, substrat, climat, topographie, présence de certains ions, nature de l'eau, intensité du drainage, temps de formation, ...*).

Trois grandes tendances existent mais reposent principalement sur les propriétés observables de la morphologie et la composition du sol telles que la profondeur, la couleur, la texture, la structure, la composition chimique et la morphologie du sol (*épaisseur des différents horizons*) ainsi que les propriétés de l'humus (*type, nature, épaisseur*).

- L'*école russe* se base sur le climat, l'hydrologie et puis sur les processus évolutifs pour faire des unités inférieures ;
- La *classification américaine* ou *classification FAO* part d'une description statistique des caractères des sols et réalise le lien avec l'écologie dans un deuxième temps. Elle regroupe 11 ordres ;
- La *classification européenne* considère simultanément le milieu, le processus et le caractère. La classification française regroupe 12 classes.

REMARQUE : Bien que ces écoles s'opposent, les sols les plus typiques gardent le même nom pour les 3 classifications.

Cependant, 2 facteurs majeurs sont à prendre en considération.

- Le *climat* (*température, précipitations et saisons*) : Un sol influencé principalement par le climat est appelé *sol zonal* ;
- La *nature de la roche mère* : Le sol influencé par la roche est dit *sol intrazonal* ou *azonal*.

Le tableau ci-dessous reprend les principaux types de sols rencontrés en fonction soit du climat, soit de la nature de la roche parentale. La figure ci-dessous reprend un schéma des sols les plus fréquents.

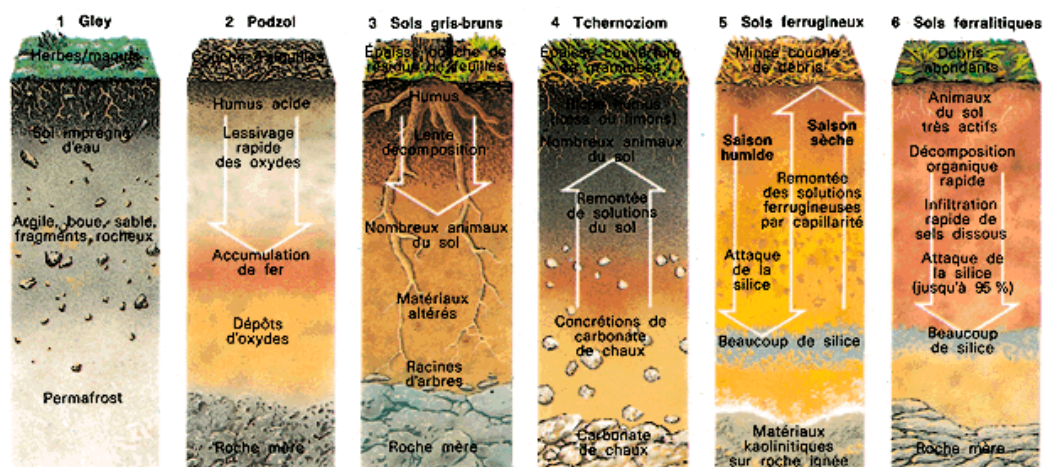


Figure 7.2 - Description des profils de sols les plus fréquents (Source : Internet).

MATERIAUX : Sols

Les profils de sols mettent en évidence l'influence à la fois du climat et de la végétation sur la roche. Un gley (1) se forme au-dessus du permafrost de la toundra. Le podzol (2) est typique des forêts de la taïga. Le sol gris-brun (3) des forêts et le tchernoziom (4) des prairies tempérées sont riches en substances organiques. Les sols ferrugineux (5) se trouvent en climat tropical sec et les sols ferrallitiques ou latéritiques (6), en climat demeurant très humide toute l'année.

Tableau 7.I - Classification des sols.

FAMILLE	PARAMETRES	NOMENCLATURE	CARACTERISTIQUES	
A. SOLS ZONAUX				
	CLIMAT			
Pôle	Froid - sec	Pergélisol	<ul style="list-style-type: none"> Sol gelé en permanence sauf une fine couche (<i>mollisol</i>). 	
	Froid - humide	Podzol	<ul style="list-style-type: none"> Sol caractéristique de forêts de conifères, très acide et bien drainé Type d'humus : Mor Horizons ABC bien différenciés : Présence de grains de quartz à la base de l'horizon A (<i>horizon cendré</i>) et accumulation d'oxydes dans l'horizon B. Sol contenant de la vermiculite, de la smectite et de la kaolinite 	
	Tempéré - humide	Sol brun	<ul style="list-style-type: none"> Sol caractéristique de forêt de feuillus et de la steppe. Type d'humus : Mull (<i>en voie de lessivage</i>). Horizons peu différenciés ; 	
	Chaud - humide	Sol rouge	<ul style="list-style-type: none"> Sols riches en oxydes de fer (<i>couleur rouge</i>) ; Horizons peu différenciés. 	
			Sol ferrallitique	<ul style="list-style-type: none"> Sol caractéristique de la région méditerranéenne. Altération moins poussée et moins différencié d'une roche mère carbonatée
		Très chaud - très humide.	Sol ferrallitique Bauxite	<ul style="list-style-type: none"> Sol épais caractéristique de la forêt dense tropicale. La transformation des minéraux instables en argile et divers hydroxydes est totale excepté pour le quartz. La matière organique abondante est complètement dégradée sur les premiers centimètres.
Equateur	Chaud - sec	Sol latéritique "latérite"	<ul style="list-style-type: none"> Sol riche en hydroxyde de fer et kaolinite, issus de granite et de gneiss. Le terme "latérite" regroupe 2 types de dépôts : <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Les vrais dépôts sédentaires formés in situ <input checked="" type="checkbox"/> Dépôts transportés et souvent composés d'un mélange d'argile et d'autres minéraux. Ce type de dépôt est appelé <i>latérite détritique</i>. 	
B. SOLS A PEDOCLIMAT CONTRASTE : Grande variation de climats saisonniers entraînant des cycles de saturation - dessèchement qui a des répercussions sur la végétation.				
	Hiver: froid - sec Été: chaud - orageux	Chernozem	<ul style="list-style-type: none"> Sol noir typique des steppes se développant sur carbonate. Épais horizon A car conservation de l'humus ⇒ terre noire très fertile. Décarbonatation du niveau supérieur et accumulation des carbonates dans la partie inférieure au début de sécheresse (<i>été</i>). Sol contenant de la montmorillonite. 	
	Alternance de période humide et sèche.	Vertisol	<ul style="list-style-type: none"> Sol noir ou gris se développant sur substrat argileux Sol de cuvette mal drainée qui, lorsqu'il est sec, présente de grandes fentes de retrait. 	
C. SOLS INTRAZONAUX				
	Nature roche- mère			
	Roche siliceuse	Ranker		
	Roche volcanique	Andozol	<ul style="list-style-type: none"> Sol comportant principalement un horizon humifère. 	
	Roche carbonatée	Rendzine	<ul style="list-style-type: none"> Le calcaire actif freine la dégradation de la matière organique qui demeure présente de manière uniforme sur le profil AC. Présence de débris de roche non altérée. 	
D. SOLS AZONAUX				
		Sol peu évolué (faible altération)	<ul style="list-style-type: none"> Sol jeune sur forte pente (<i>sans cesse rajeuni</i>). Sol formé sur matériaux récents ou renouvelés (<i>alluvion de lit d'inondation</i>) Sol peu évolué en raison de la sécheresse (<i>désert</i>) ou du froid (<i>toundra</i>). 	

REMARQUE : Sous les climats tropicaux à saison sèche marquée, la savane l'emporte sur la forêt. Les processus d'altération sont interrompus par le manque d'eau. Le **sol ferrugineux** exposé aux rayons solaires et à la dessiccation, durcit et forme une cuirasse.

7.1.4 Caractérisation d'un sol

Plusieurs paramètres caractérisent un sol :

7.1.4.1 Texture et structure du sol

La texture d'un sol dépend notamment du calibre des particules qui le composent. La nomenclature empruntée aux terrains meubles détritiques est adoptée pour spécifier le type de sol. Ainsi, les adjectifs les plus courants sont les suivants : *argileux*, *argilo-limoneux*, *limono-argileux*, *argilo-sableux*, *limoneux*, *limono-sableux*, *sablo-limoneux* et *sableux*.

La texture et la structure commandent la porosité totale du sol et la circulation de l'eau et des gaz. Selon les cas, le sol sera bien aéré ou au contraire asphyxiant.

- La **structure** du sol ou mode d'assemblage des particules intervient selon 2 formes différentes :
 - Une **structure particulaire** : Les particules sont indépendantes les unes des autres ;
 - Une **structure grumeleuse** : Les particules s'agglutinent en agrégats et sont à l'état floculé.
- La **texture** ou le **calibre des particules minérales** détermine en grande partie la capacité d'un sol à stocker l'eau, élément vital pour les plantes et sa productivité.
 - Un **sol sableux** ne peut stocker suffisamment d'eau pour une alimentation correcte des plantes. De plus, une grande partie des sels minéraux migre vers le sous-sol. Ce sol devient très vite stérile ;
 - Un **sol limoneux ou argilo-**, moins perméable, constitue un excellent réservoir d'eau et de substances minérales directement absorbables par les végétaux ;
 - Un **sol argileux**, imperméable, a tendance à se gorger d'eau. C'est un sol lourd, collant, difficile à labourer et souvent mal aéré ; ce qui nuit à la croissance normale des plantes.

7.1.4.2 Acidité du sol

L'acidité d'un sol se définit par la concentration en ion H^+ dans le sol et l'eau.

$$pH = - \log [H^+]_{sol}$$

Certaines plantes ne peuvent pas pousser sur des sols acides ($pH < 6$) tandis que d'autres s'en accommodent.

REMARQUE : Pour neutraliser l'acidité d'un sol, de la chaux peut (CaO) peut être incorporé dont les ions Ca^{+2} se fixent sur les colloïdes, et l'anion CO_3 se combine avec H^+ . Cette pratique du chaulage permet de cultiver les sols développés sur des roches granitiques.

7.1.4.3 Capacité d'absorption

La **capacité d'absorption** est le *pouvoir de fixation des ions minéraux sur les colloïdes due à des phénomènes électriques*. Les complexes colloïdaux électro-négatifs absorbent les cations libres en particulier les cations métalliques (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et appelés *bases échangeables*.

Ainsi, cette capacité qui dépend de la teneur du sol en colloïdes et en cations disponibles, détermine la fertilité naturelle du sol. C'est grâce également à ses propriétés que l'on peut améliorer le sol (*l'ajout de fertilisant enrichit le sol en bases échangeables*).

7.2 LATERITE ET SOLS LATERITIQUES

La **latérite** (du latin *later*, brique) est un terme général qui désigne une *famille de sol rouge ou brun formé par altération particulière (ferralitisation ou latérisation) de roches sous un climat tropical (alternance de périodes sèche et humide)*. Ce terme désigne l'ensemble des matériaux (meubles ou indurés) riches en hydroxydes de fer (d'où la couleur rouge) et/ou d'aluminium situés en surface. Cependant, il existe une grande diversité de définitions.

Il s'agit d'un sol maigre, lessivé, pauvre en silice et en éléments nutritifs (Ca, Mg, Na, K) mais riche en fer et en aluminium (*présence de bauxite exploitée comme minerai d'aluminium*) qui se forment principalement par le processus d'hydrolyse. Il s'agit de bonne réserve d'eau car ce sol filtre environ 50 % de l'écoulement global.

REMARQUE : Ces sols sont impropres à l'agriculture, vu leur manque en éléments nutritifs.

La latérite actuelle recouvre 33 % des continents, principalement en domaine intertropical (*régions intertropicales d'Afrique, d'Australie, d'Inde, du sud-est asiatique et d'Amérique du sud*). Des gisements fossiles existent dans d'autres régions plus sèches du monde (*Allemagne, Condroz belge, etc.*).

Lorsqu'ils sont frais, la latérite se découpe en blocs réguliers. Exposée à l'air, elle durcit rapidement et résiste alors remarquablement aux agents météorologiques. C'est pourquoi elle est utilisée en construction (*route, maison*).

Une latérite peut se former à partir de n'importe quelle roche pour autant que le climat soit tropical. Cependant, chaque type de roche donne un type de latérite caractérisée par une texture et une composition chimique particulière influencé par le climat (*pluviométrie, température comprise entre 18 et 30°C, bilan hydrique, ...*), la topographie (*érosion, drainage favorisé pour une faible pente, ...*) et la végétation (*matières organiques, acides humique, drainage, ...*). La végétation influe sur la teneur en éléments grossiers des horizons superficiels des sols latéritiques en limitant l'érosion (*les débris de quartz et gravillons se concentrent par suite de l'entraînement des matériaux fins par les eaux de ruissellement*). L'action des racines provoque aussi une certaine homogénéisation de ces matériaux et permet de réduire le drainage des sols (*frein dans le processus de latérisation*).

Lors de l'altération de la roche, les minéraux de base (*feldspaths, micas, carbonates, pyroxène, amphibole, olivine*) disparaissent de même que le quartz. Une bonne partie des ions ainsi formés est lessivée par solution (*notamment la silice*) tandis que le reste demeure sur place pour former de nouveaux minéraux de 2 types principaux :

- Les **hydroxydes et oxydes de fer** (*limonite, goethite, hématite, ...*) et **d'aluminium** (*gibbsite, corindon, ...*) ;
- Les **argiles** dont le type dépend du taux de lessivage de la roche. L'état le plus avancé (lessivage maximal) fournit de la kaolinite et de la gibbsite alors que l'état le plus faible fournit des illites et des chlorites.

Un profil d'altération typique des massifs latéritiques contient la succession suivante de haut vers le bas :

- La **cuirasse latéritique** de couleur rouge est une couche indurée très dure (*difficilement destructible par les engins à lame*) suite à l'exposition à l'air, constituée de nodules soudés (*aspect de scorie*) et comportant principalement des oxydes et hydroxydes de fer (*jusqu'à 75 %*) et d'aluminium, du quartz et de la kaolinite. Elle peut être naturellement fragmentée ;
- La **carapace** ou **horizon latéritique** est une formation très dure (*peut être détruite par une pioche ou un engin de terrassement*), tachetée composée de nodules d'oxydes de fer et d'aluminium (*composition similaire à la cuirasse latéritique*). Les zones claires sont plus riches en quartz et les taches de rubéfaction sont dues à la kaolinite. Le fond matriciel peut être jaune, rose ou bien rouge ;
- Le **sol fin, saprolithe fine** ou **lithomarge** se caractérise par un sol fin riche en eau et composé d'opale et de minéraux secondaires d'altération ;
- La **saprolithe grossière, graveleux latéritique** ou **arène** a une composition dominée par la nature de la roche-mère et se caractérise par la présence de fragments de roche et de minéraux primaires. Ce niveau est utilisé en domaine routier ;
- La **roche mère** de nature silico-alumineuse.

L'épaisseur de ce profil varie de quelques mètres à plus de 100 mètres.

7.3 **BAUXITE, KAOLIN ET AUTRES SOLS D'ALTERATION ALUMINEUX**

7.3.1 **Kaolin**

Le **kaolin** est une argile blanche friable et réfractaire (*fond à 1 800°C*), composé principalement de kaolinite ou de silicates d'aluminium.

Il provient de 2 gisements distincts :

- Un **gisement primaire** provenant de l'altération de roche composée de feldspath et associé à des paillettes de mica et du sable de quartz. Il est généralement présent sous forme de poche ;
- Un **gisement secondaire** résulte de l'entraînement de kaolin hors du gisement primaire et de sa redéposition.

Il est utilisé dans la fabrication de la porcelaine et du papier et contiennent généralement peu de fer. Employés seuls, ils sont d'une utilisation difficile à cause de leur faible plasticité et de leur point de fusion élevé. Par conséquent, l'ajout d'autres matériaux au kaolin permet d'obtenir des pièces vitrifiées comme la porcelaine.

7.3.2 Bauxite

La *bauxite* découverte en France (*Baux de Provence*) en 1821, se définit comme une *roche tendre résiduelle riche en aluminium* (60–80%) ; d'où son exploitation comme source d'aluminium. Il appartient aux sols ferrallitiques.

Ce dépôt provient d'un milieu riche en quartz, feldspaths, en muscovite et en pyrite, soit un milieu riche en SiO₂, K, Al, FeS et O qui suivent les évolutions suivantes lors d'une altération superficielle en climat tropical humide (*Afrique, etc.*) ; ce qui implique la présence d'eau. Les processus de formation sont assez complexes.

- La *silice* (SiO₂) est peu soluble et reste en place. Par contre, l'opale (SiO₂.nH₂O) est soluble et donne la kaolinite ;
- Le *potassium* est un élément très soluble. Il quitte donc le milieu ;
- L'*aluminium* se solubilise à des valeurs de pH peu fréquentes dans la nature (pH < 3 et pH >10). Par contre, il se mobilise sous forme d'Al₂O₃.nH₂O (*gibbsite, diaspore, boehmite*). D'autre part, la réaction entre SiO₄⁻ et l'eau fournit des ions H⁺ qui acidifie le milieu ;
- Le *sulfure de fer* s'oxyde en oxyde et hydroxyde de fer (*goethite*) ; d'où la couleur rouge de la cuirasse latéritique. Le soufre quitte le milieu ;
- Les *feldspaths* s'altèrent en argiles (*kaolinite*) et en minéraux titanés (*rutile, anatase*)

Le tableau ci-dessous reprend ses principales caractéristiques de la bauxite.

Tableau 7.II - Caractérisation d'un dépôt de bauxite

Caractéristiques	Dépôt de bauxite
Type	Roche tendre
Structure	Structure variable mais souvent pisolithique (<i>pisolithes pris dans un ciment</i>)
Couleur	<ul style="list-style-type: none"> • Blanche (<i>sans Fe</i>) : convient pour la céramique. • Jaunâtre (<i>goethite</i>) • Rosée à rouge (<i>hématite</i>)
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Bauxite autochtone ou primaire • Bauxite allochtone ou secondaire

Pour être exploitable en céramique, la bauxite ne doit pas contenir trop d'éléments nuisibles tels que le SiO₂ (< 1 % - réaction avec le fondant qui est la cryolite - Na₃Al F₆ - pour former un complexe contenant de l'aluminium ⇒ perte de l'aluminium) et le Fe₂O₃ (modifie la couleur).

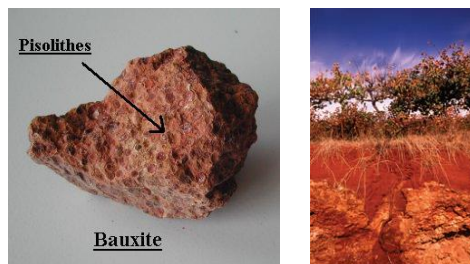


Figure 7.3 - Photo d'une bauxite et d'un terra rossa

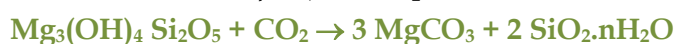
7.3.3 Terra rosa

La *terra rosa* est une argile rouge composée d'oxyde de fer, d'hydroxyde d'aluminium et de composés alcalino-terreux.

7.4 ALTERITES VERTES OU DEPOTS DE ROCHES MAGNESIENNES

L'altération d'une péridotite en milieu basique fournit l'antigorite qui est le composant principal de la serpentine. Cette dernière peut être tectonisée et les fissures ainsi créées vont se colmater en *asbeste* jadis couramment employé pour ses propriétés réfractaires (*isolant, frein, etc.*) et le fer se transforme en *magnétite*.

Si la serpentine est remaniée par une eau riche en CO₂, il y a carbonatation en *magnésite* (*revêtement des fours de haut-fourneau, fondant, marbre "vert antique"*) et en opale selon la réaction suivante :



Si le milieu est sursaturé en silice, il y a formation de talc, de *phlogopite* ou de *vermiculite*. Ce dernier minéral ($Mg_3 Al Si_3 O_{10} (OH) \cdot 4 H_2O$) a une structure similaire à celle des micas qui, lors d'un chauffage à 628°C, gonfle en forme d'accordéon (*vermiculite expansée*) utilisé pour ses propriétés isolantes. Sa densité passe de 2,6 à 0,9.

7.5 DEPOTS RESIDUELS METALLIQUES

Bien que certains minéraux soient inertes à l'altération ($(Fe, Mn)WO_4, SnO_2, TiO_2, \dots$), certains minéraux évoluent à proximité de la surface pour former des minerais utiles selon les conditions.

- Les *oxydes* :
 - *En milieu d'oxydation*, la magnétite se transforme en hématite selon le phénomène de *martitisation*. L'hématite se transforme par la suite en goethite. La chromite s'oxyde en eskolaïte et l'ilménite ($FeTiO_3$) plus résistante se décompose en hématite et en anatase non récupérable par broyage.
 - *En milieu réducteur* (*percolation d'eau et présence de matières organiques et de bactéries*), la magnétite est lessivée et l'ilménite fournit de fins grains de rutilite récupérable par filtre.
- Les *sulfures* présents dans des filons en contact avec des roches calcaires et la nappe sont souvent altérés en surface. La partie supérieure exposée à la lixiviation et à l'oxydation, se caractérise par un bourgeonnement à la surface appelé *chapeau de fer* en raison de la présence de goethite (*oxydation quasi complète du fer*). Sous ce chapeau, se trouvent des minerais sous forme de carbonates de Pb, Zn, Cu et Fe, d'oxydes d'argent, des silicates et des phosphates. Cette zone encore en milieu oxydante, se situent sur une zone en milieu réducteur riche en sulfures.

7.6 DEPÔTS RESIDUELS QUARTZO-FELDSPATHIQUES

Une désintégration rapide de la roche à grains grossiers (*granite, grès, etc.*) peut donner lieu à un sable feldspathique ou arkosique dont la composition est formée principalement de quartz et de feldspaths. C'est le cas de dépôts observés dans le désert du Gobi.

7.7 AUTRES DEPÔTS RESIDUELS

7.7.1 Loupes de glissement

Lorsqu'une pente est couverte de terrains meubles, un certain volume de ceux-ci peut se détacher et glisser en masse vers le bas ou il s'accumule sous forme d'une loupe de glissement. Ce phénomène est plus clairement détaillé dans le volume applications - mouvement de terres.

7.7.2 Eboulements

Il peut arriver dans les montagnes ou les zones escarpées que des blocs ou une masse rocheuse se détachent et s'accumulent au pied du versant sous forme d'un *cône* ou *talus d'éboulis*. La pente de ce talus dépend des matériaux constitutifs.

Ces éboulis peuvent être volumineux au point que certaines montagnes au point que certaines montagnes sont partiellement ensevelies sous leurs propres débris.

La sédimentation des éboulis opère un classement très imparfait. Les gros blocs roulent jusqu'en bas de pente tandis que les petits fragments restent sur les parties hautes du cône.

8. BIBLIOGRAPHIE