Largile et Lamotte

GUIDE DU SOL

ENESAD - Unité Informatique Pédagogique
Lucie Pasquier

A ORIGINE DU SOL 9

A.1 Le sol issu de la désagrégation du sous-sol 9

A.2 Les constituants minéraux du sol issus de la désagrégation du sous-sol 9

B LES CONSTITUANTS, LES CARACTERISTIQUES ET LES COMPORTEMENTS PHYSIQUES DU SOL 10

B.1 Les constituants physiques du sol 10

B.1.1 Les constituants mécaniques du sol 10

B.1.1.1 L'analyse granulométrique : classification des éléments minéraux selon leur grosseur 10
B.1.1.2 Les cailloux 10
B.1.1.3 Les graviers 10
B.1.1.4 Les sables grossiers et fins 11
B.1.1.5 Les limons grossiers et fins 11
B.1.1.6 Les argiles 11
B.1.1.6.1 Argile granulométrique et argile minéralogique 11
B.1.1.6.2 La structure de l'argile lui confère un pouvoir adsorbant 11
B.1.1.6.3 Les propriétés de l'argile 12
B.1.1.6.4 Les deux états de l'argile ont une influence sur la stabilité structurale du sol 12

B.1.2 Les constituants organiques ou matières organiques du sol 13

B.1.2.1 Etapes de la formation des matières organiques : décomposition et humification 13
B.1.2.2 Les différentes catégories de la matière organique dans le sol 14
B.1.2.2.1 Les quatre fractions de la matière organique dans le sol 14
B.1.2.2.2 La biomasse du sol 14
B.1.2.2.3 La matière organique fraîche 14
B.1.2.2.4 Les produits transitoires 14
B.1.2.2.5 L'humus 15
B.1.2.3 L'humus a les caractéristiques d'un colloïde organique électronégatif 15
B.1.2.4 Association de l'argile et de l'humus en un complexe argilo-humique 15

B.1.3 Les constituants liquides ou solution du sol 16

B.1.3.1 L'eau du sol 16
B.1.3.2 Les éléments dissous dans l'eau du sol 16

B.1.4 Les constituants gazeux ou atmosphère 16

B.2 La texture déterminée par la composition granulométrique du sol 17

B.2.1.1 Classification texturale 17
B.2.1.2 Influence de la texture sur les propriétés physiques du sol 17

B.3 La structure traduit l'organisation spatiale des constituants physiques 18

B.3.1 La structure du sol et son évolution : les trois niveaux d'organisation 18

B.3.1.1 La structure du sol peut évoluer 18
B.3.1.2 1er niveau : l'état interne des mottes 18
B.3.1.3 2ème niveau : le mode d'assemblage des mottes 19
B.3.1.4 3ème niveau : regroupement des modes d'assemblage 20

B.3.2 Les différents états structuraux confèrent au sol certaines propriétés 20

B.3.3 Stabilité structurale et résistance aux agents de dégradation 21

B.3.3.1 Les facteurs de la stabilité structurale 21

B.3.3.2 Le phénomène de battance et l'indice de battance 22
B.3.3.2.1 La battance rend la surface du sol imperméable 22
B.3.3.2.2 Calcul de l'indice de battance d'un sol 22
B.3.3.2.3 Lutter contre la battance 23
B.3.3.3 Les phénomènes de tassement et de compactage 23
B.3.3.3.1 Le compactage diminue la porosité du sol 23
B.3.3.3.2 Eviter le tassement et le compactage 23
B.3.3.3.3 La semelle de labour : un obstacle à la pénétration racinaire 24
B.3.3.4 L'action du gel et du dégel 24
B.3.3.5 Protection de la stabilité structurale 25
B.4 La porosité dépend de la texture et de la structure du sol 25
B.4.1 Définition de la porosité - Valeur de la porosité 25
B.4.2 Porosité texturale 25
B.4.3 Porosité structurale 26
B.5 Les caractéristiques physiques du sol : humidité, température, aération, chaleur 26
B.5.1 L'humidité 26
B.5.1.1 La teneur en eau du sol ou l'humidité 26
B.5.1.2 Les forces s'exerçant sur l'eau du sol : gravité, succion racinaire, succion de la terre 26
B.5.1.3 Les différents états de l'eau 27
B.5.1.4 L'état physique du sol conditionne les caractéristiques hydriques 27
B.5.1.4.1 L'humidité à la capacité au champ d'un sol 27
B.5.1.4.2 L'humidité au point de flétrissement 27
B.5.1.4.3 L'humidité équivalente 27
B.5.1.4.4 La Réserve Utile (RU) et la Réserve Facilement Utilisable (RFU) 28
B.5.1.4.5 L'état structural conditionne tous les déplacements de l'eau 28
B.5.1.4.5.1 Les différents mouvements de l'eau dans le sol 28
B.5.1.4.5.2 Infiltration : notions de sols perméables et imperméables 29
B.5.1.4.5.3 Filtration ou drainage 29
B.5.1.4.5.4 Diffusion 29
B.5.2 La température dépend de l'absorption de la chaleur 29
B.5.3 L'aération du sol dépend de l'état structural et de l'état hydrique 29
C LES CONSTITUANTS CHIMIQUES DU SOL ET LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES 31
C.1 Les processus physico-chimiques : le pouvoir adsorbant du complexe argilo-humique (CAH) 31
C.1.1 Le pouvoir adsorbant des colloïdes 31
C.1.1.1 Le complexe argilo-humique retient des ions à sa surface 31
C.1.1.2 L'adsorption des ions est sélective 31
C.1.2 La capacité d'échange des cations (CEC) dépend du complexe adsorbant 32
C.1.2.1 La capacité d'échange en cations (CEC) 32
C.1.2.2 Le taux de saturation du complexe adsorbant 32
C.1.2.3 Le pouvoir alimentaire du sol ou offre potentielle des éléments 32
C.1.2.4 Les ions adsorbés sont échangeables avec la solution 33
C.1.2.5 Facteurs des échanges des cations entre le complexe argilo-humique et la solution 33
C.2 Réaction du sol : pH et variation 34
C.2.1 Le pH : l'indicateur de l'ambiance ionique du sol 34
C.2.2 Le pH intervient dans l'étude des propriétés physiques des sols 34
C.2.3 Les variations de pH et le pouvoir tampon 35

C.2.3.1 Le pH du sol varie 35
C.2.3.2 Le pouvoir tampon : capacité des sols à s'opposer aux variations de pH 35

C.3 Principaux éléments chimiques : N, P, K - Ca, Mg, S, Na et les oligo-éléments 35

C.3.1 Différents états des éléments dans le sol et le potentiel alimentaire du sol 35

C.3.1.1 Les ions sont soit à l'état libres, fixés ou adsorbés 35
C.3.1.2 Le déplacement des éléments nutritifs dans le sol 36
C.3.1.3 Biodisponibilité des éléments et pouvoir alimentaire du sol 36

C.3.2 Les nutriments dans le sol 36

C.3.2.1 Les principaux cations métalliques : calcium, magnésium, potassium, sodium 36
C.3.2.1.1 Le calcium Ca dans le sol 36
C.3.2.1.1.1 Les formes du calcium dans le sol 36
C.3.2.1.1.2 La teneur en calcium varie selon les sols 37
C.3.2.1.1.3 L'état calcique du sol 37
C.3.2.1.1.3.1 Etat calcique et pH 37
C.3.2.1.1.3.2 Le calcium et les propriétés physico-chimiques du sol 37
C.3.2.1.1.4 Evolution de l'état calcique 37
C.3.2.1.1.5 Diagnostic de l'état calcique 38
C.3.2.1.1.6 L'état calcique est modifié par l'apport d'amendements calcaires 38
C.3.2.1.2 Le magnésium Mg dans le sol 39
C.3.2.1.2.1 Formes du magnésium dans le sol 39
C.3.2.1.2.2 Conséquences agronomiques d'une carence en magnésium 39
C.3.2.1.3 Le potassium K dans le sol 40
C.3.2.1.3.1 Formes du potassium dans le sol 40
C.3.2.1.3.2 Dynamique d'échange du potassium 41
C.3.2.1.4 Le sodium Na dans le sol 41
C.3.2.2 Les trois principaux anions : azote, phosphore, soufre 41
C.3.2.2.1 L'azote N dans le sol 41
C.3.2.2.1.1 Formes de l'azote dans le sol et le cycle de l'azote 41
C.3.2.2.1.2 L'azote organique 42
C.3.2.2.1.3 L'azote minéral 42
C.3.2.2.1.4 La minéralisation de l'azote 42
C.3.2.2.1.5 Les pertes d'azote 43
C.3.2.2.2 Le phosphore P dans le sol 43
C.3.2.2.2.1 Formes du phosphore dans le sol 43
C.3.2.2.2.2 Les problèmes d'assimilabilité du phosphore 44
C.3.2.2.2.3 L'état phosphate d'un sol 44
C.3.2.2.3 Le soufre S dans le sol 44
C.3.2.2.3.1 Formes du soufre dans le sol 44
C.3.2.2.3.2 Forme organique du soufre et minéralisation 45
C.3.2.2.3.3 Forme minérale du soufre 45
C.3.2.2.3.4 Conséquences pour la nutrition soufrée 45
C.3.2.3 Les oligo-éléments : fer, manganèse, zinc, cuivre, molybdène, bore 45
C.3.2.3.1 Les différents états des oligo-éléments dans le sol 45
C.3.2.3.2 Teneur du sol en oligo-éléments 46
C.3.2.3.3 Les facteurs de l'assimilabilité des oligo-éléments 46

D LES ETRES VIVANTS DU SOL ET ASPECTS BIOLOGIQUES 48

D.1 Macro et microfaune du sol et leurs fonctions 48

D.1.1 Les principaux représentants de la macro et de la microfaune 48

D.1.2 Les rôles de la faune du sol 48

D.1.2.1 Une action mécanique : amélioration de la stabilité structurale 48
D.1.2.2 Une action chimique : enrichissement en minéraux assimilables 48
D.1.2.3 Une action biologique : stimulation de la flore microbienne 48

D.2 Les micro-organismes végétaux du sol et leurs fonctions 49

D.2.1 Micro-organismes aérobies ou anaérobies, autotrophes ou hétérotrophes 49

D.2.2 Deux types de microflores : microflore de destruction et d'assimilation 49

D.2.3 La rhizosphère et l'effet rhizosphère 50

D.2.4 Les facteurs de l'activité microbienne 50

D.3 Les fonctions de l'activité biologique 51

D.3.1 Transformation de la matière organique 51

D.3.1.1 La décomposition de la matière organique du sol 51
D.3.1.1.1 Définition de la décomposition de la matière organique fraîche 51
D.3.1.1.2 Les deux phases de la décomposition 51
D.3.1.2 L'humification 51
D.3.1.2.1 Le processus d'humification 51
D.3.1.2.2 Les différents types d'humus formés selon les conditions de milieu 52
D.3.1.3 La minéralisation 52
D.3.1.3.1 La minéralisation de la matière organique 52
D.3.1.3.2 Minéralisation de la matière organique fraîche et des produits transitoires 52
D.3.1.3.3 Minéralisation de l'humus : évolution de l'humus en matières minérales 53
D.3.1.3.4 Les facteurs de la minéralisation de la matière organique 53

D.3.2 Les associations nutritives avec la plante 54

D.3.2.1 Solubilisation directe ou indirecte de nombreux composés minéraux 54
D.3.2.2 Nitrification, dénitrification 54
D.3.2.3 Fixation biologique de l'azote gazeux 54

E LA FERTILITE DU SOL ET SON AMELIORATION 55

E.1 Le sol et la plante cultivée 55

E.1.1 Fonctionnement global de la plante cultivée 55

E.1.1.1 La plante : un être autotrophe 55
E.1.1.2 Le fonctionnement des peuplements végétaux 55
E.1.1.2.1 La photosynthèse 55
E.1.1.2.2 Le métabolisme 55
E.1.1.2.3 La respiration 55
E.1.1.3 La germination des semences et la levée des plantules 56
E.1.1.4 La croissance et le développement des organes aériens et souterrains 56
E.1.1.4.1 Circulation des produits de la photosynthèse dans la plante 56
E.1.1.4.2 Croissance et développement de la plante 56

E.1.2 Le sol : support physique de la plante 57

E.1.2.1 La plante fixée au sol grâce à l'ancrage du système racinaire 57
E.1.2.2 En tant que support, le sol doit être meuble, stable et le plus profond possible 57

E.1.3 La nutrition minérale de la plante et l'évaluation des besoins 57

E.1.3.1 Les trois principaux éléments des plantes : carbone, oxygène, hydrogène 57
E.1.3.2 Les autres éléments minéraux 58
E.1.3.2.1 Les macro-éléments : azote, potassium, calcium, magnésium, soufre, phosphore, sodium 58
E.1.3.2.1.1 Importance et rôle de l'azote dans la plante 58
E.1.3.2.1.2 Importance et rôle du potassium dans la plante 58
E.1.3.2.1.3 Importance et rôle du calcium dans la plante 59
E.1.3.2.1.4 Importance et rôle du magnésium dans la plante 59
E.1.3.2.1.5 Importance et rôle du soufre dans la plante 59
E.1.3.2.1.6 Importance et rôle du phosphore dans la plante 60
E.1.3.2.1.7 Importance et rôle du sodium dans la plante 60
E.1.3.2.2 Les micro-éléments ou oligo-éléments dans la plante : fer, manganèse, zinc, cuivre, bore, molybdène 60
E.1.3.2.2.1 Particularités communes aux oligo-éléments 60
E.1.3.2.2.2 Teneurs des sols et des végétaux en oligo-éléments 60
E.1.3.2.2.3 Les carences en oligo-éléments 61
E.1.3.2.2.4 Importance et rôle du fer Fe dans la plante 61
E.1.3.2.2.5 Importance et rôle du manganèse Mn dans la plante 61
E.1.3.2.2.6 Importance et rôle du zinc Zn dans la plante 62
E.1.3.2.2.7 Importance et rôle du cuivre Cu dans la plante 62
E.1.3.2.2.8 Importance et rôle du bore B dans la plante 63
E.1.3.2.2.9 Importance et rôle du molybdène Mo dans la plante 63

E.1.4 Biodisponibilité des éléments et absorption racinaire 64

E.1.4.1 Le potentiel alimentaire du sol 64
E.1.4.1.1 Les plantes prélèvent les éléments minéraux à l'état d'ions dissous 64

E.1.4.1.2 La disponibilité des ions dans le sol dépend de deux facteurs 64
E.1.4.2 L'absorption des éléments minéraux par les racines 64
E.1.4.2.1 L'absorption des éléments nécessaires à la plante 64
E.1.4.2.1.1 L'absorption d'eau par les racines 64
E.1.4.2.1.2 L'absorption d'oxygène utile à la respiration racinaire 65
E.1.4.2.1.3 L'absorption des éléments minéraux solubles 65
E.1.4.2.2 Les mécanismes de l'absorption racinaire 66
E.1.4.2.2.1 Absorption des éléments minéraux au niveau de la zone pilifère 66
E.1.4.2.2.2 Déplacement des éléments dissous de la solution du sol vers les racines 66
E.1.4.2.2.3 Mobilisation des éléments minéraux dans la rhizosphère 66
E.1.4.2.2.4 Le système racinaire développe une surface d'échange sol-racines 66
E.1.4.2.2.5 Le développement des racines dépend de la structure du sol 66
E.1.4.2.2.6 L'absorption sélective des éléments minéraux 67
E.1.4.2.2.7 Les antagonismes d'absorption 67
E.1.4.2.3 Concurrence entre plantes cultivées et adventices vis-à-vis de l'absorption 67
E.1.4.2.4 Facteurs de l'activité racinaire 68
E.1.4.2.4.1 Une bonne aération et une bonne humidité favorisent l'activité racinaire 68
E.1.4.2.4.2 L'absorption racinaire des éléments dépend du pH 68
E.1.4.2.4.3 Interaction entre activité racinaire et activité microbienne 68

E.2 Méthode d'étude et d'appréciation des sols en agronomie 69

E.2.1 L'étude sur le terrain : le profil cultural 69
E.2.1.1 Le profil cultural 69
E.2.1.2 La partition latérale : observation des endroits des passages des roues d'engins 70
E.2.1.3 La partition verticale : observation des différents horizons 70
E.2.1.4 Description de l'état structural et autres observations 70
E.2.1.4.1 Organisation de l'état structural 70
E.2.1.4.2 Description et interprétation des couleurs au sein d'un horizon 71
E.2.1.4.3 Description du système racinaire 71
E.2.1.4.4 Détermination grossière de la texture 72
E.2.2 L'étude en laboratoire : l'analyse de sol 73
E.2.2.1 L'analyse physique 73
E.2.2.1.1 Analyse granulométrique et interprétation 73
E.2.2.1.2 Teneur en matière organique et interprétation 74
E.2.2.1.3 Dosage du calcaire total et interprétation 74
E.2.2.1.4 Dosage du calcaire actif et interprétation 74
E.2.2.1.5 Mesure du pH et interprétation 75
E.2.2.1.6 Mesure du rapport C/N 75
E.2.2.2 L'analyse chimique 76
E.2.2.2.1 Dosage des bases échangeables Ca, Mg, P, K et interprétation 76
E.2.2.2.1.1 Dosage du calcium 76
E.2.2.2.1.2 Dosage du phosphore 76
E.2.2.2.1.3 Dosage du potassium 77
E.2.2.2.1.4 Dosage du magnésium 78
E.2.2.2.1.5 Dosage du sodium 78
E.2.2.2.2 Dosage des oligo-éléments et interprétation 78
E.2.2.2.3 Mesure de la CEC : Capacité d'Echange Cationique 79

E.3 Le contrôle de l'humidité 80

E.3.1 Les excès d'eau et les procédés d'assainissement 80
E.3.1.1 Les causes de l'excès d'eau et les moyens de lutte 80
E.3.1.1.1 Les causes du mauvais écoulement de l'eau 80
E.3.1.1.2 Le ruissellement de l'eau en surface 80
E.3.1.2 Conséquences de l'excès d'eau sur les propriétés du sol 81
E.3.1.2.1 Altération des propriétés physiques du sol 81
E.3.1.2.1.1 Un excès d'eau entraîne une baisse de la stabilité structurale 81
E.3.1.2.1.2 Un excès d'eau entraîne une diminution de l'aération 81
E.3.1.2.2 Conséquences sur les propriétés chimiques du sol 81
E.3.1.2.2.1 Un excès d'eau provoque acidification et décalcification 81
E.3.1.2.2.2 Un excès d'eau rend le milieu réducteur 82
E.3.1.2.3 Conséquences sur les propriétés biologiques du sol 82
E.3.1.2.3.1 Un excès d'eau entraîne une diminution de l'activité biologique 82
E.3.1.2.3.2 Un excès d'eau perturbe le fonctionnement racinaire 82
E.3.1.3 Un moyen de lutte contre l'excès d'eau : le drainage 83
E.3.1.3.1 La nécessité du drainage 83
E.3.1.3.2 Le drainage superficiel : fossés ou profilage de surface 83
E.3.1.3.3 Le drainage en profondeur 83
E.3.2 La sécheresse et les procédés d'économie d'eau 84

E.3.2.1 Les besoins en eau des cultures : calcul du bilan hydrique 84
E.3.2.1.1 La demande en eau se traduit par l'évapotranspiration 84
E.3.2.1.2 L'offre en eau : les pluies et la Réserve Utile (RU) 84
E.3.2.2 Correction du déficit en eau 85
E.3.2.2.1 Limiter les pertes d'eau 85
E.3.2.2.2 Irriguer permet de corriger le déficit en eau 85
E.3.2.3 Les systèmes d'irrigation 85
E.3.2.3.1 Irrigation de surface 85
E.3.2.3.2 Irrigation par infiltration 86
E.3.2.3.3 Irrigation par aspersion 86
E.3.2.3.4 Micro-irrigation 86

E.4 Les amendements : substances améliorant l'ensemble des propriétés du sol 86

E.4.1 Les amendements calcaires et magnésiens et la régulation ionique du sol 86
E.4.1.1 Rôles du calcium et du magnésium 86
E.4.1.1.1 Le calcium et le magnésium sont des aliments pour les plantes 86
E.4.1.1.2 Le calcium et le magnésium sont des amendements pour le sol 87
E.4.1.1.2.1 Le rôle physique des amendements calcaires et magnésiens 87
E.4.1.1.2.2 Le rôle chimique des amendements calcaires et magnésiens 87
E.4.1.1.2.3 Le rôle biologique des amendements calcaires et magnésiens 87
E.4.1.2 Entretien de l'état calcique 87
E.4.1.3 Les différents amendements calcaires et leur action sur le sol 87
E.4.1.3.1 Les caractéristiques d'un amendement 87
E.4.1.3.2 Les chaux augmentent rapidement le pH 88
E.4.1.3.3 Les produits d'origine naturelle 88
E.4.1.3.4 Les autres sources de calcium 88
E.4.1.4 Les amendements magnésiens et calcaires-magnésiens 89

E.4.2 Les amendements humiques 89
E.4.2.1 Actions des matières organiques sur la fertilité du sol 89
E.4.2.1.1 Les matières organiques permettent le maintien des propriétés physiques 89
E.4.2.1.1.1 Les matières organiques atténuent l'effet de dégradation de la structure 89
E.4.2.1.1.2 Les matières organiques rendent la structure plus perméable 90
E.4.2.1.2 Les matières organiques améliorent les propriétés physico-chimiques 90
E.4.2.1.2.1 La décomposition des matières organiques : une source d'aliments 90
E.4.2.1.2.2 Le complexe argilo-humique formé augmente la CEC 90
E.4.2.1.3 La présence de matières organiques stimule l'activité biologique 90
E.4.2.2 Le bilan humique et le renouvellement de l'humus 91
E.4.2.2.1 La minéralisation de l'humus 91
E.4.2.2.2 Le bilan humique 91
E.4.2.3 Les différents amendements humiques 91
E.4.2.3.1 Les résidus culturaux 91
E.4.2.3.2 Les engrais de ferme 92
E.4.2.3.2.1 Le fumier 92
E.4.2.3.2.2 Le lisier 92
E.4.2.3.2.3 Le purin 92
E.4.2.3.3 Les engrais verts 92

E.5 La fertilisation minérale et les engrais 94

E.5.1 Les objectifs et le raisonnement de la fertilisation 94
E.5.1.1 Objectifs de la fertilisation 94
E.5.1.2 Raisonner la fertilisation 94
E.5.1.2.1 Connaître les besoins des plantes 94
E.5.1.2.2 Connaître l'offre du sol 94
E.5.1.2.3 Exemple : le raisonnement de la fertilisation azotée 95

E.5.2 Les engrais 95
E.5.2.1 Les principaux types d'engrais 95
E.5.2.1.1 Les engrais renferment trois types d'éléments 95
E.5.2.1.2 Classement des engrais selon leur origine 96
E.5.2.1.3 Classement des engrais d'après le nombre d'éléments qu'ils apportent 96
E.5.2.1.4 Présentation physique des engrais 96
E.5.2.2 Les engrais azotés fournisseurs d'ions NH_4^+ et NO_3^- 96
E.5.2.2.1 Les engrais azotés organiques libèrent régulièrement leurs éléments 96
E.5.2.2.2 Les engrais azotés ammoniacaux ont une action soutenue 96
E.5.2.2.3 Les engrais azotés nitriques ont une action immédiate 97
E.5.2.3 Les engrais potassiques fournisseurs d'ions K^+ 97
E.5.2.4 Les engrais phosphatés 97

E.5.2.4.1 Les engrais phosphates solubles 97
E.5.2.4.2 Les engrais phosphates hyposolubles 97
E.5.2.4.3 Les engrais phosphates insolubles 97
E.5.2.5 Les engrais soufrés 98
E.5.2.6 Les produits magnésiens 98
E.5.2.7 Les produits calcaires 98
E.5.2.8 La fertilisation en oligo-éléments 98
E.5.2.8.1 La source ou forme de l'oligo-élément à apporter 98
E.5.2.8.2 Les modes d'apports des oligo-éléments 99
E.6 Le travail du sol 100
E.6.1 Objectifs du travail du sol 100
E.6.1.1 Obtenir le profil cultural recherché 100
E.6.1.1.1 Créer un état structural favorable 100
E.6.1.1.2 Le lit de semences 100
E.6.1.1.3 La couche arable 101
E.6.1.1.4 L'horizon sous la couche labourée 101
E.6.1.2 Contrôler la végétation adventice 101
E.6.1.3 Enfouir les résidus culturaux, les amendements, les engrais et les pesticides 102
E.6.2 Les diverses façons culturales 102
E.6.2.1 Les principaux outils de travail du sol 102
E.6.2.2 Mode d'action des outils 103
E.6.2.3 Les accidents structuraux induits par les pratiques culturales 103
E.6.2.4 Les façons préalables : déchaumage, sous-solage et décompactage 104
E.6.2.4.1 Déchaumage 104
E.6.2.4.1.1 Objectifs du déchaumage 104
E.6.2.4.1.2 Outils utilisés pour le déchaumage 105
E.6.2.4.2 Sous-solage et décompactage 105
E.6.2.4.2.1 Compaction du sol 105
E.6.2.4.2.2 Objectifs du sous-solage et du décompactage 105
E.6.2.4.2.3 Les outils utilisés pour sous-soler et décompacter 106
E.6.2.5 Les façons principales : les labours 106
E.6.2.5.1 Les objectifs du labour 106
E.6.2.5.2 Action de la charrue 107
E.6.2.6 Les façons complémentaires : les pseudo-labours et les façons d'entretien 108
E.6.2.6.1 Les pseudo-labours 108
E.6.2.6.2 Reprise profonde des labours 108
E.6.2.6.3 Reprise superficielle 108
E.6.2.6.4 Les façons d'entretien : roulage, binage 109
E.6.2.6.4.1 Roulage 109
E.6.2.6.4.2 Binage 109
E.6.3 Simplification du travail du sol 110
E.6.3.1 Intérêt de la simplification du travail du sol 110
E.6.3.2 Le labour n'est pas toujours indispensable 110
E.6.3.3 Le travail superficiel 111
E.6.3.4 Le semis direct 111

A ORIGINE DU SOL

A.1 Le sol issu de la désagrégation du sous-sol

Les éléments minéraux du sol proviennent de la décomposition du sous-sol, appelé **roche-mère** ou **substrat**.

Les processus de décomposition sont la désagrégation physique du substrat et l'altération chimique du substrat, dont l'intensité dépend du climat.

¤ La **désagrégation physique** de la roche est due :

- à la fragmentation et à la fissuration dues à des écarts de température ;
- à l'érosion éolienne ;
- à l'écartement des fissures sous l'effet du gel et des racines ;

Elle aboutit à la formation des éléments sableux (cailloux, graviers, sables, limons).

¤ L'**altération chimique**, ou transformation des minéraux de la roche, est due à des réactions chimiques : dissolutions (eau + CO_2) ou hydrolyses (eau + bases ou acides). L'altération chimique du substrat aboutit à la formation du complexe d'altération : argiles, silice, oxyde de fer et d'alumine, et sels plus ou moins solubles.

A.2 Les constituants minéraux du sol issus de la désagrégation du sous-sol

Les **constituants minéraux** issus de la désagrégation du substrat sont les **éléments sableux** : cailloux, graviers, sables, limons, et le **complexe d'altération** : argiles, silice, oxyde de fer et d'alumine, et sels plus ou moins solubles.

B LES CONSTITUANTS, LES CARACTERISTIQUES ET LES COMPORTEMENTS PHYSIQUES DU SOL

B.1 Les constituants physiques du sol

B.1.1 Les constituants mécaniques du sol

B.1.1.1 L'analyse granulométrique : classification des éléments minéraux selon leur grosseur

La **granulométrie** classe les éléments minéraux, appelés également éléments mécaniques, d'après leur grosseur et détermine le pourcentage de chaque fraction.

La granulométrie contribue à définir la texture du sol. On distingue dans un premier temps les **éléments grossiers** de diamètre supérieur à 2mm, de la **terre fine** de diamètre inférieur à 2mm.

Echelle granulométrique :

Terre fine					**Eléments grossiers**	
< 2 µ	2µ - 20µ	20µ - 50µ	50µ - 200µ	200µ - 2mm	2mm - 2cm	>2cm
argiles	limons fins	limons grossiers	sables fins	sables grossiers	graviers	cailloux

B.1.1.2 Les cailloux

Les **cailloux** sont des constituants mécaniques grossiers issus de la désagrégation de la roche-mère.

Leur taille est **supérieure à 2 cm**.

La quantité de cailloux et de graviers détermine la **pierrosité** du sol. Une teneur trop importante en éléments grossiers pose des problèmes pour le travail du sol. Un moyen de diminuer la pierrosité du sol est l'**épierrage**.

B.1.1.3 Les graviers

Les **graviers** sont des constituants mécaniques grossiers issus de la désagrégation de la roche-mère.

Leur taille est **comprise entre 2mm et 2cm**.

La quantité de cailloux et de graviers détermine la **pierrosité** du sol. Un moyen de diminuer la pierrosité est l'**épierrage**.

B.1.1.4 Les sables grossiers et fins

Les sables sont des constituants mécaniques issus de la désagrégation de la roche-mère.

Ce sont les plus gros éléments de la terre fine. On distingue les **sables grossiers** de taille comprise entre 0,2 mm et 2 mm, des **sables fins** de taille comprise entre 0,05 mm et 0,2 mm.

Si la teneur en sables est très faible, on peut sabler : le **sablage** consiste à apporter du sable pour modifier la texture du sol. Cette action est surtout pratiquée sur des parcelles maraîchères.

B.1.1.5 Les limons grossiers et fins

Les limons sont des constituants mécaniques issus de la désagrégation de la roche-mère.

On distingue les **limons grossiers** de taille comprise entre 0,02 mm et 0,05 mm, des **limons fins** de taille comprise entre 0,002 mm et 0,02 mm.

B.1.1.6 Les argiles

B.1.1.6.1 Argile granulométrique et argile minéralogique

Le terme « argile » fait référence soit à l'**argile granulométrique**, soit à l'**argile minéralogique**.

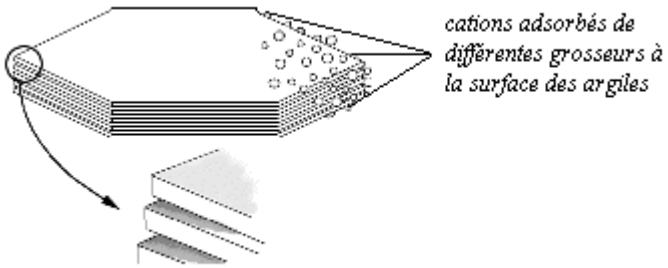
L'**argile granulométrique** définit les constituants mécaniques issus de l'altération de minéraux silicatés de la roche-mère, regroupant l'ensemble des particules de diamètre **inférieur à 2 *µ*m** : les argiles proprement dites, des particules de quartz, de micas et de calcaire. Ce sont les plus petits éléments de la terre fine.

L'**argile minéralogique** désigne le minéral issu de la désagrégation de la roche-mère.

B.1.1.6.2 La structure de l'argile lui confère un pouvoir adsorbant

Les **argiles** sont de fins cristaux, de forme hexagonale, constitués de feuillets. C'est la disposition et la distance qui les sépare qui caractérisent le type d'argile. Les micelles argileuses sont **chargées négativement** à leur surface ce qui leur confère un **pouvoir adsorbant des cations** (chargés positivement) à leur surface.

Cette surface de fixation et d'échange est très développée du fait de la structure feuilletée.



Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

B.1.1.6.3 Les propriétés de l'argile

L'argile possède les caractéristiques d'un colloïde électronégatif (possédant des charges négatives à sa surface).

Elle est très hydrophile, c'est-à-dire qu'elle à la capacité de se lier facilement avec l'eau. Elle présente ainsi les caractéristiques suivantes :

- la **plasticité** : elle peut être modelée,
- l'**adhésivité** : elle se colle aux pièces métalliques des outils,
- le **gonflement** et le **retrait**, c'est-à-dire que l'argile change de volume selon le degré d'humidité du sol.

L'alternance **humectation - dessiccation** est responsable du gonflement - retrait des colloïdes argileuses. Lorsque le sol argileux se dessèche, les colloïdes se rétractent, des **fissures** se créent dans la masse de terre qui se crevasse.

Retrait argileux

B.1.1.6.4 Les deux états de l'argile ont une influence sur la stabilité structurale du sol

Dans une solution, l'argile peut être à l'**état floculé** ou à l'**état dispersé**. Ces deux états sont réversibles.

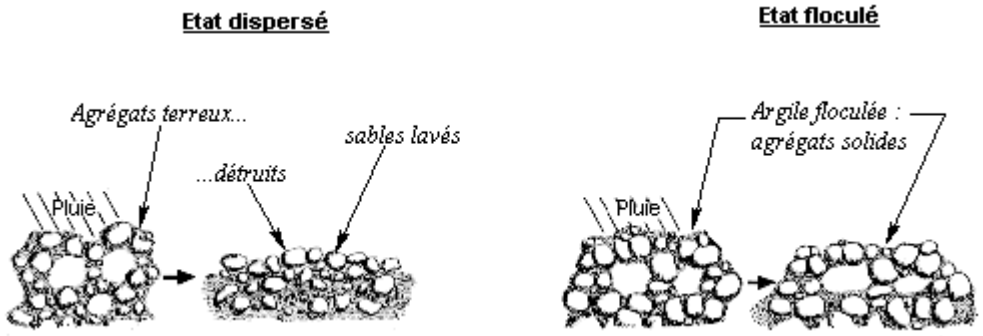
La **floculation** est le rassemblement des particules argileuses du sol sous l'action des ions positifs (comme le **calcium**) de la solution du sol. Ainsi agglutinées, les micelles argileuses se déposent.

Les cations présents dans la solution n'ont pas tous le même **pouvoir floculant** :
Pouvoir floculant décroissant des cations : $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+} > H^{+} = K^{+}$. Le **calcium** pouvant être apporté sous forme d'amendements calcaires (chaux,...) est le **cation floculant** par excellence. Le magnésium a les mêmes propriétés que le calcium, mais son pouvoir floculant est moindre.

A l'état floculé, l'argile et l'eau se séparent facilement, les micelles s'agglutinent et se condensent autour des éléments sableux et forment ainsi des agrégats cohérents : il s'agit du processus d'**agrégation**. La structure de surface résiste à la dégradation de la pluie : le sol reste perméable à l'eau et à l'air, maintenant ainsi les vies racinaire et microbienne. L'argile étant moins adhésive, le travail du sol est facilité.

La **dispersion** est due aux charges électriques de même signe (négatif) entourant les micelles d'argile : ces dernières se repoussent alors sans cesse et ne peuvent se déposer.

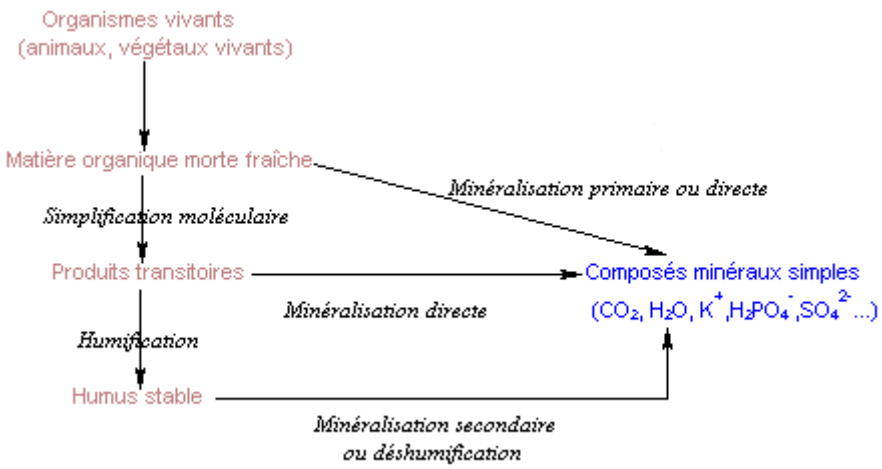
A l'état dispersé, l'argile forme avec l'eau un mélange homogène, et a tendance à gonfler. Elle perd alors son aptitude à souder les agrégats terreux. La pluie aura tendance à dégrader la structure de surface qui se transforme en une nappe continue. Le sol prend alors une structure compacte, asphyxiante et donc défavorable à la vie des racines et des microbes. Il est de plus difficile à travailler.



Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

B.1.2 Les constituants organiques ou matières organiques du sol

B.1.2.1 Etapes de la formation des matières organiques : décomposition et humification



Arrivée au sol, la **matière organique fraîche** subit des décompositions successives par les animaux et les végétaux. La biodégradation de la matière organique fraîche s'oriente dans deux voies parallèles et liées : la **minéralisation** et l'**humification**.

La dégradation de la matière organique fraîche se fait en deux étapes :

1ère étape : matière organique fraîche → produits transitoires ou « humus jeune »

2ème étape, l'humification : « humus jeune » → humus stable.

La 1ère étape dans la création de cet **humus** est l'apparition d'« humus jeune » ou **produits transitoires** : ils jouent un rôle très important dans la stabilité de la structure. L'essentiel de cette phase dépend de la nature des matériaux enfouis. Certaines substances de la matière organique fraîche sont faciles à décomposer, telles que les sucres, l'amidon, la cellulose et les protéines (provenant d'espèces améliorantes telles que les feuillus et graminées) : elles disparaîtront très vite avec production d'eau et de CO_2. Les substances moins faciles à décomposer sont la lignine, les résines, les tanins et les matières grasses (provenant d'espèces acidifiantes : bruyères ou résineux).

B.1.2.2 Les différentes catégories de la matière organique dans le sol

B.1.2.2.1 Les quatre fractions de la matière organique dans le sol

La matière organique du sol comprend quatre fractions : la matière organique vivante composée d'**êtres vivants** (appelée biomasse), la **matière organique fraîche**, les **produits transitoires** et l'**humus**. Matière organique fraîche, produits transitoires et humus constituent la **matière organique morte**.

Les sols cultivés renferment en moyenne 1 à 3 % de matière organique soit 40 à 120 t/ha sur 30 cm de profondeur.

La teneur en matière organique d'un sol dépend de la nature du sol et du travail effectué.

B.1.2.2.2 La biomasse du sol

La **biomasse** (végétaux et animaux vivants) du sol représente plusieurs tonnes de matière organique à l'hectare.

B.1.2.2.3 La matière organique fraîche

Les débris végétaux et animaux ou la **matière organique fraîche**, non encore transformée, a globalement la même composition que les débris de végétaux dont elle provient, elle contient :

- des substances carbonées C, O, H ;
- des matières azotées C, O, H, N, et P, S ;
- des sels minéraux.

B.1.2.2.4 Les produits transitoires

Les **produits transitoires** proviennent des premières scissions des molécules organiques de la matière organique fraîche (alcools, sucres, phénols, acides organiques, acides aminés, tanins). Leur présence dans le sol est éphémère puisqu'ils seront vite repris par les micro-organismes pour aboutir à la troisième fraction : l'humus stable.

Les produits transitoires sont plus ou moins solubles et plus ou moins évolués, ils sont composés :

- de résidus de lignine et de cellulose ;
- de matières azotées à divers stade.

B.1.2.2.5 L'humus

Au lieu de se minéraliser complètement, certaines des molécules des produits transitoires se regroupent, se condensent, se polymérisent pour aboutir à des substances nouvelles à très grosses molécules, l'**humus stable**.

La quantité et la nature de l'humus stable formé dépendent des matières premières (débris végétaux...) et des conditions du milieu (aération, humidité, acidité, température,...).

L'humification résulte de processus biologiques mais est aussi due à des agents physiques et à des réactions chimiques :

- fixation d'azote, l'humus contient environ 5% de l'azote total du sol ;
- oxydations (fixations d'O_2) si l'aération est suffisante ;
- polymérisations qui amènent à l'humus stable.

B.1.2.3 L'humus a les caractéristiques d'un colloïde organique électronégatif

L'humus présente des charges négatives à sa périphérie : il est **électronégatif**. Son **pouvoir adsorbant** est élevé, il faut 4 à 5 fois plus de cations pour saturer l'humus que pour saturer l'argile.

La présence d'humus dans un sol améliore donc le pouvoir de rétention des cations du sol.

L'humus est **hydrophile** : il peut ainsi retenir une quantité importante d'eau (environ 15 fois son poids). Il joue ainsi un rôle primordial dans l'**économie de l'eau du sol**. Mais toute l'eau retenue n'est pas disponible pour la plante, une grande partie est énergiquement retenue ; c'est ainsi que des sols humifères peuvent devenir secs si le drainage est trop profond.

B.1.2.4 Association de l'argile et de l'humus en un complexe argilo-humique

Les micelles de l'humus, électronégatives comme celles de l'argile, ne peuvent se fixer directement sur ces dernières (répulsion des charges de même signe). Cependant argile et humus s'associent en un **complexe argilo-humique** grâce à des cations intermédiaires (Ca^{2+}en sols calcaires, Fe^{2+} en sols bruns).

La formation du complexe argilo-humique permet de souder les éléments sableux entre eux : il y a **formation d'agrégats**.

Dans cette formation complexe argilo-humique, d'une part l'humus protège l'argile contre la dispersion : c'est un colloïde protecteur. Cette association est importante quand il y a excès d'humidité pour éviter la dispersion des argiles et assurer la **stabilité structurale**. D'autre part, l'argile protège l'humus de sa destruction par les micro-organismes et favorise ainsi l'**humification**.

B.1.3 Les constituants liquides ou solution du sol

B.1.3.1 L'eau du sol

L'**eau** présente dans le sol provient de deux sources : des **précipitations** et des apports par **irrigation**.

L'eau forme autour des éléments du sol des films très fins.

La teneur en eau du sol détermine le **taux d'humidité**, caractéristique physique du sol.

L'eau du sol constitue un **élément indispensable à la vie des plantes** : elle assure le transport des substances nutritives dans le végétal et est source d'oxygène et d'hydrogène.

B.1.3.2 Les éléments dissous dans l'eau du sol

Les éléments solubles dissous dans l'eau proviennent de la décomposition de la roche-mère et des matières organiques. Il s'agit des ions : **Ca^{2+}**, **Mg^{2+}**, **K^{+}**, **Na^{+}**, **H_3O^{+}**, **PO_4^{3-}**, **SO_4^{2-}**, **CO_3^{-}**, **NO_3^{-}**, etc.

Ces éléments simples constituent les **éléments nutritifs** disponibles pour la plante.

B.1.4 Les constituants gazeux ou atmosphère

Encore appelés **atmosphère du sol**, les constituants gazeux se trouvent dans les cavités ou pores du sol. Ils proviennent de l'air extérieur, de la vie des organismes, et de la décomposition des matières organiques.

L'**air du sol** est constitué :

- des constituants de l'air extérieur : diazote N_2 et dioxygène O_2 ;
- des gaz issus des décompositions organiques et de la respiration des êtres vivants : dioxyde de carbone CO_2, dihydrogène H_2, et méthane CH_4.

L'air du sol, **source d'oxygène**, est indispensable à la vie de la faune et de la flore du sol.

L'aération du sol est un des facteurs du bon fonctionnement de l'**activité microbienne** (décomposition, minéralisation, humification, assimilation) et de l'**activité racinaire** (absorption des éléments minéraux).

B.2 La texture déterminée par la composition granulométrique du sol

B.2.1.1 Classification texturale

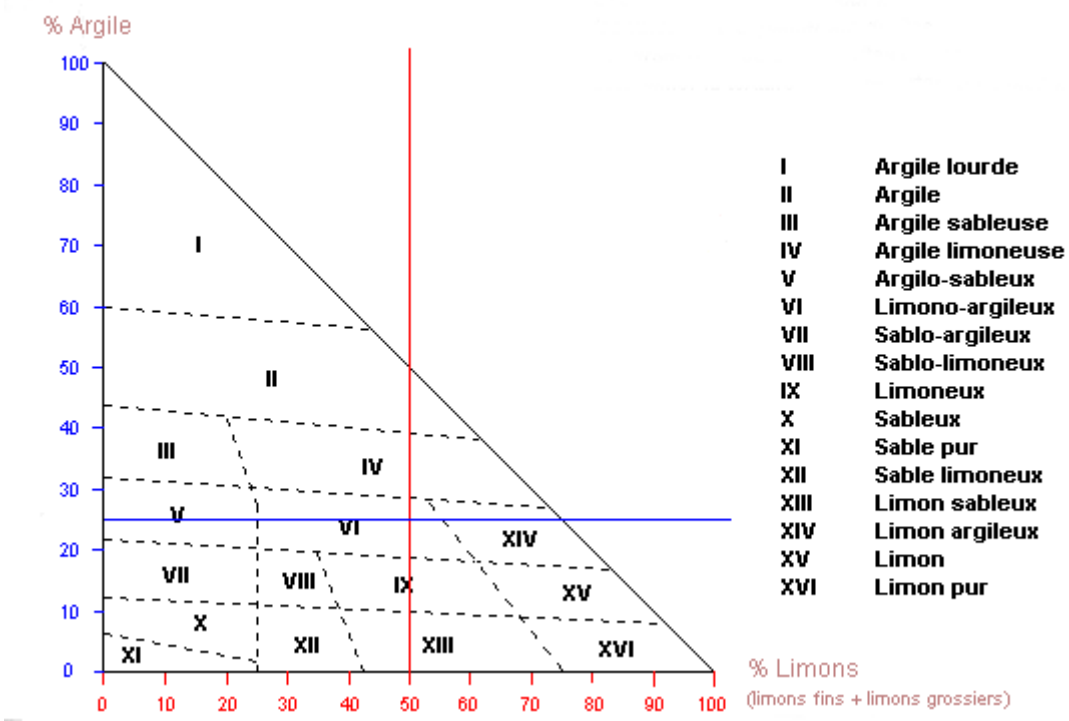
La **texture d'un sol** est l'ensemble des propriétés qui découlent de la composition granulométrique du sol (teneur en pourcentage de sables grossiers et fins, de limons, d'argile, d'humus et de calcaire).

Elle est déterminée par l'**analyse granulométrique**.

La composition granulométrique permet ainsi de déterminer la texture globale d'un sol en se référant à un diagramme textural.

Cette classification texturale regroupe les sols en classes ayant un comportement et des propriétés communes. Ainsi définir la texture d'un sol permet de lui attribuer les propriétés propres à cette classe de sols.

Triangle des texture GEPPA



B.2.1.2 Influence de la texture sur les propriétés physiques du sol

Si les sables grossiers dominent, ils laissent entre eux des vides, la porosité texturale est importante. Ceci contribue à une bonne circulation de l'air et de l'eau dans le sol. Mais l'absence de colloïdes (argile et humus) limite la rétention d'eau.
⇒ **le sol est filtrant, perméable.**

Si des sables fins et des limons fins accompagnent les sables grossiers, les vides sont colmatés : le sol se tasse facilement sous l'effet de la pluie.
⇒ **le sol devient battant et imperméable à l'eau.**

Si s'ajoutent aux sables grossiers de l'argile et de l'humus, ces colloïdes permettent la formation d'agrégats : la circulation de l'air et de l'eau est facilitée, et de l'eau est retenue sur les agrégats pour les plantes.
⇒ **le sol a une structure fragmentaire.**

B.3 La structure traduit l'organisation spatiale des constituants physiques

B.3.1 La structure du sol et son évolution : les trois niveaux d'organisation

B.3.1.1 La structure du sol peut évoluer

La **structure d'un sol** est l'assemblage des différents constituants physiques du sol à un moment donné.

Elle évolue sous l'influence de différents types d'agents externes : pièces travaillantes des outils, roues d'engins, précipitations, alternances gel-dégel, ou dessication-humectation, systèmes racinaires, faune du sol...

Combinant leur action avec celle des forces de pesanteur, ces agents développent dans le sol des contraintes qui provoquent elles-mêmes des ruptures, des déformations ou des déplacements.
Il s'en suit une modification des caractéristiques globales qui définissent **la structure du sol** : dimension et forme des fragments terreux, porosité, cohésion.

Les constituants de la structure sont les **mottes**, éléments structuraux formés par les actions de fragmentation et de compactage des outils. Le premier niveau de description concerne leur état interne, les deux autres leur assemblage.

Ainsi, on observe **trois niveaux d'organisation structurale** dans le profil cultural :

- 1er niveau : **l'état interne des mottes**. Une **motte** est le résultat de l'assemblage naturel de plusieurs agrégats entre eux. Elle a une taille moyenne de quelques centimètres. L'**agrégat** est l'unité fondamentale d'organisation de la structure. Il résulte de l'assemblage cohérent des particules élémentaires du sol.

- 2ème niveau : **le mode d'assemblage des mottes** et l'importance des cavités.

- 3ème niveau : **le regroupement des modes d'assemblage**.

B.3.1.2 1er niveau : l'état interne des mottes

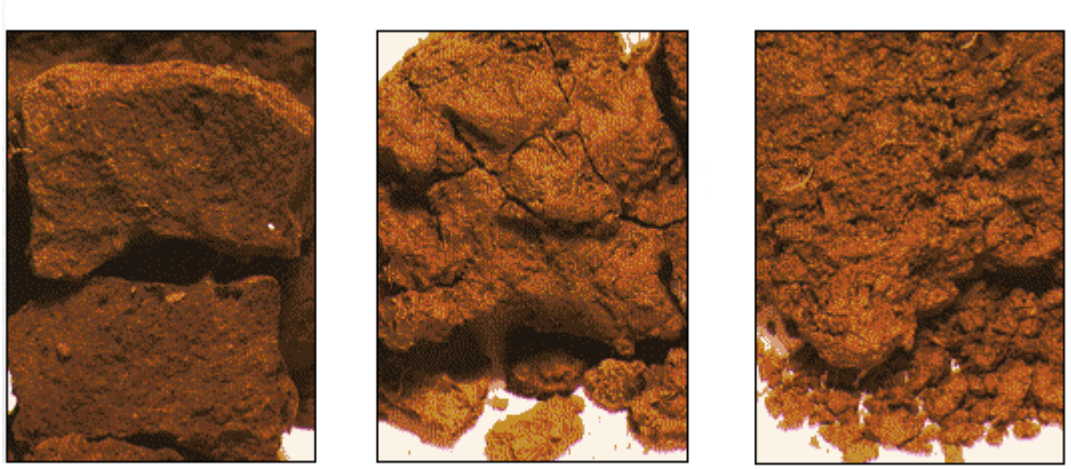
Après fragmentation manuelle des mottes, on observe l'aspect des faces de rupture obtenues. Quelque soit le matériau et son humidité, trois états internes peuvent se présenter et sont visuellement facilement identifiables.

1er niveau : état interne des mottes

ETAT INTERNE	PRINCIPALES CARACTERISTIQUES
Δ delta	**Aspect continu**. Les faces de fragmentation sont peu rugueuses, de forme typiquement conchoïdale. **Porosité structurale nulle**. **Résulte d'un compactage sévère** suite au travail du sol. Cohésion élevée en sec.
ϕ phi	**Proche de Δ, mais contient des amorces de fissures. Résulte typiquement, par exemple, de l'action du gel.**
Γ gamma	**Les agrégats**, dont la morphologie est variable, **sont discernables dans les mottes. Rugosité assez importante des faces de fragmentation des mottes. Porosité structurale non nulle, assez variable**. Cohésion plus faible que pour Δ.

Source : Guide méthodique du profil cultural, GAUTRONNEAU et MANICHON

Δ et Γ sont les deux **principaux état internes** des mottes. L'état interne Φ des mottes dérive de l'état Δ par le jeu des agents naturels (gel principalement), il présente en plus des fissures.



Mottes Δ Mottes Φ Mottes Γ

B.3.1.3 2ème niveau : le mode d'assemblage des mottes

Si dans le volume examiné n'existe qu'**une seule motte**, on parle d'**état massif (M)** ; si au contraire plusieurs mottes sont associées, on note leur degré de liaison et, lorsque c'est possible , leur calibre et le rapport mottes/terre fine. L'évolution de ce niveau d'organisation sous l'effet d'agents climatiques peut être importante entre les périodes de travaux culturaux.

2ème niveau : mode d'assemblage des mottes

UN ELEMENT STRUCTURAL	PLUSIEURS ELEMENTS STRUCTURAUX	
structure continue ↓ **M** Massif (**structure continue**)	**S**oudés entre eux ↓ ↓	Individualisés ↓ **F** Fragmentaire (**structure fragmentaire**)
	Difficilement discernables ↓ **SD** Soudés Difficilement discernables	**F**acilement discernables ↓ **SF** Soudés Facilement discernables

Présence de cavités : suffixe V (>5cm) ou v (1 à 5 cm)
Fentes de retrait : R

Source : Guide méthodique du profil cultural, GAUTRONNEAU et MANICHON

B.3.1.4 3ème niveau : regroupement des modes d'assemblage

3ème niveau : regroupement des modes d'assemblage et interprétation de leur origine

ETAT TYPE	DEFINITION ET ORIGINE
o *(comme **o**uvert)*	Dominance des modes d'assemblage **Fragmentaire** et **Soudés Facilement Discernables**, sans mottes décimétriques ni cavités importantes. Terre fine abondante. ***Typiquement** : bande labour fortement émiettée*
b *(comme **b**loc)*	Dominance des modes d'assemblage **Massif et Fragmentaire avec cavités.** Mottes décimétriques, séparées par des cavités structurales importantes. Peu de terre fine. ***Typiquement** : bande labour peu fragmentée (grosses mottes)*
c *(comme **c**ontinu)*	Pas de discontinuités structurales notables, dominance des modes d'assemblage **Massif et Soudés difficilement Discernables.** ***Typiquement** : effet de compactage post-labour sur terre très fortement émiettée.*

Source : Guide méthodique du profil cultural, GAUTRONNEAU et MANICHON

B.3.2 Les différents états structuraux confèrent au sol certaines propriétés

Il existe **plusieurs états structuraux**, chacun étant caractérisé par un **état interne des mottes** et un type de **regroupement des modes d'assemblage**.

Dans les sols à **structures o Γ ou o Δ** :

- l'eau et l'air circulent dans l'ensemble du profil : l'excès d'eau s'écoule ;
- il y a une bonne aération nécessaire à la vie des animaux et des racines ;
- la pénétration des outils est facilitée ainsi que la préparation du lit de semence ;
- la germination est favorisée, les racines pénètrent le sol en profondeur et explorent un volume maximal de sol contenant les ressources nutritives pour la plante.

On retrouve ces caractéristiques de manière moins prononcée pour les **états structuraux b Γ** - présentant des vides formés par l'association de gros blocs - puis pour les **états c Γ** plus compacts.

Les sols à **structure c Δ** :

- l'eau est retenue dans les pores et ne s'infiltre pas en profondeur, elle occupe la place de l'air, le milieu est ainsi pauvre en oxygène : le sol est asphyxiant ;
- l'activité biologique est faible ;
- la colonisation radiculaire est difficile ;
- le travail du sol est difficile.

Les **états structuraux b Δ** sont proches des **états c Δ.** Dans les premiers, les racines profitent des vides pour se développer et croître ; mais il existe également des problèmes quant à la circulation de l'eau et de l'air.

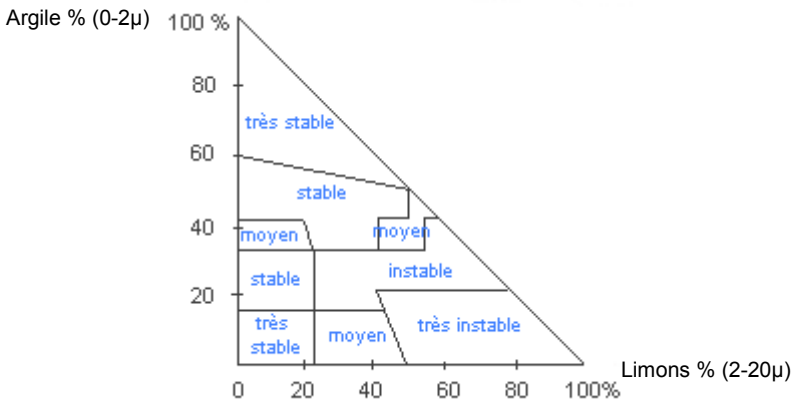
Les **états structuraux o Γ ou o Δ** sont à rechercher lors de la préparation du sol.

B.3.3 Stabilité structurale et résistance aux agents de dégradation

B.3.3.1 Les facteurs de la stabilité structurale

La structure du sol peut évoluer avec le temps, en fonction du climat et des différentes actions culturales.

La **stabilité structurale** désigne la résistance de la structure vis-à-vis des agents de dégradation. La formation d'agrégats solides et résistant à la dégradation par l'eau assure une bonne stabilité structurale au sol.



Classes de la stabilité structurale
Source : Le sol. Vilain

Ainsi, la stabilité structurale dépend :

- de la texture du sol : les sols à teneur élevée en limons sont plus sensibles aux processus de dégradation par l'eau responsables de la battance. Mais il est difficile de modifier la texture d'un sol. Les apports de sable ou d'argile demeurent irréalisables en raison des masses considérables qu'il faudrait apporter au sol pour atteindre même un résultat modéré ;

- de la nature des cations adsorbés sur le complexe argilo-humique : tous les cations n'ont pas le même pouvoir floculant des argiles. La présence d'ions **calcium** (par apport important de chaux) et **magnésium** sur le complexe argilo-humique améliore la stabilité structurale des sols riches en limons fins, contrairement à celle d'ions potassium et sodium qui ont une action dispersante des argiles ;

- de la matière organique : les produits transitoires issus de la décomposition de la matière organique enfouie enrobent les agrégats terreux assurant ainsi leur stabilité structurale. L'humus a également un effet stabilisateur quoique moins intense mais plus durable.

B.3.3.2 Le phénomène de battance et l'indice de battance

B.3.3.2.1 La battance rend la surface du sol imperméable

En sol cultivé, le phénomène de **battance** a des conséquences néfastes vis-à-vis de la germination-levée et de la formation du ruissellement.

Ce **processus de désagrégation de la structure** par l'eau se déroule invariablement selon deux grandes étapes :

- dans un premier temps, la surface du sol se ferme par une mince croûte structurale. Cette dernière est formée par les particules fines qui sont détachées des mottes sous l'effet de fortes pluies. Elle a pour effet de diminuer la capacité d'infiltration de l'eau, ce qui accroît les risques d'apparition d'excès d'eau ;

- dans un second temps apparaît et se développe une croûte de dépôt, appelée **croûte de battance**, dans les micro-dépressions : s'il pleut, il y a excès d'eau, les particules détachées se déplacent et se déposent en phase liquide. Il se forme des microstrates très peu perméables et difficiles à franchir en cas de dessiccation.

Les sols sont d'autant plus **sensibles au phénomène de battance** qu'ils présentent un horizon de surface à texture caractérisée par l'**abondance relative des limons et des sables** et une **pauvreté relative en argiles**, une structure à cohérence faible, une faible stabilité structurale et un faible taux de matières organiques.

Vue d'un sol recouvert d'une croûte de battance

B.3.3.2.2 Calcul de l'indice de battance d'un sol

La connaissance de la **granulométrie** du sol permet de calculer l'**indice de battance** d'un sol :

$$I_B = (1{,}5\ LF + 0{,}75\ LG) / (A + 10\ MO)$$

LF : teneur en limons fins (%)
LG : teneur en limons grossiers (%)
A : teneur en argile (%)
MO : teneur en matière organique (%)

Cet indice permet de classer les comportements des sols dans une région donnée (caractérisée par le climat,...). Ainsi face à de fortes précipitations, **les sols sont plus ou moins battants** :

Valeur de l'indice de battance	Réaction du sol

I_B>2	sol très battant
1,8<I_B<2	sol battant
1,6<I_B<1,8	sol assez battant
1,4<I_B<1,6	sol peu battant
I_B<1,4	sol non battant

Les **sols battants** sont **riches en limons** (surtout limons fins). La proportion des colloïdes argileux et humiques est trop faible pour assurer la cohésion satisfaisante entre les limons.

B.3.3.2.3 Lutter contre la battance

Pour **lutter contre la battance**, il faut :

- **augmenter la cohésion** des éléments du sol par apport de matière organique ou par chaulage pour augmenter le pH ;

- **diminuer l'action de l'eau sur la surface du sol** : favoriser le bon écoulement de l'eau, éviter un excès de terre fine, créer un relief au semis ;

- **diminuer l'impact des gouttes d'eau en surface** par la protection du sol par un mulch (couche de paille destinée à couvrir le sol), par l'implantation d'un couvert végétal, par l'absence de labour avant l'hiver.

B.3.3.3 Les phénomènes de tassement et de compactage

B.3.3.3.1 Le compactage diminue la porosité du sol

Le **tassement du sol** représente une diminution de la porosité du sol en fonction des passages d'animaux et d'engins (passage du tracteur sur sol humide...), du climat (précipitations,...).

Il y a formation de **mottes compactes**, peu poreuses et consistantes à l'état sec.

Le tassement du sol se produit le plus souvent en surface et au niveau de la couche labourée. Un **sol non travaillé** a également tendance à se tasser au fil du temps, sous l'effet d'agents naturels : pesanteur, pluies, etc.

Ces états structuraux entraînent une **baisse de la porosité du sol** d'où :

- une diminution de la perméabilité ;
- une aération et une circulation de l'eau rendues difficiles ;
- une augmentation de la résistance à la pénétration racinaire.

B.3.3.3.2 Eviter le tassement et le compactage

Pour éviter le compactage du sol, il suffit de **diminuer la pression exercée au sol** par les engins (par une augmentation de la surface de contact : pneus plus larges...) **et le nombre de passages** (combiner les outils de travail du sol), et agir sur la **stabilité structurale** du sol.

Les actions de **décompactage** et de **sous-solage** permettent de briser ces états structuraux en ameublissant le sol.

Compactage de limon

B.3.3.3.3 La semelle de labour : un obstacle à la pénétration racinaire

L'horizon sous le dernier labour effectué peut avoir une structure soit fragmentaire, soit compacte et lamellaire. Dans ce dernier cas, on est en présence d'une **semelle de labour**.

Elle est située **entre la zone de labour et le sous-sol**.

Il s'agit d'une **zone compacte** à structure massive et continue surmontée d'une couche de quelques centimètres à structure lamellaire (conséquence du lissage de cette surface par les socs de la charrue). Cette zone n'est pas forcément régulièrement présente sur l'ensemble de la parcelle.

Une semelle de labour est une **couche très peu perméable**. Elle induit une mauvaise infiltration de l'eau et les racines la pénètrent plus ou moins facilement selon l'humidité (plus facilement si le sol est humide).

Pour lutter contre la formation de cette semelle de labour, il est conseillé de travailler le sol lorsqu'il est ressuyé. De plus, en conditions sèches, le **décompactage** permet de disloquer la semelle de labour.

Racines gênées dans leur développement par une semelle de labour. La surface lissée a été créée par un soc de charrue.

B.3.3.4 L'action du gel et du dégel

En gelant, l'eau du sol augmente de volume (suite à la formation de cristaux de glace), ainsi la porosité croît : l'effet du **gel** peut améliorer la structure du sol.

Mais le gel ne joue son rôle favorable sur **le gonflement et le retrait des colloïdes** que s'il agit sur un sol à grosses mottes. Dans ce cas la remontée d'eau lors du gel est limitée et son écoulement rapide est favorisé lors du dégel.

En revanche, **en sol bien ressuyé**, cette formation de cristaux est réduite et provoque la **formation de nombreuses petites fissures**. Si le temps froid et sec persiste, la glace finit par s'évaporer et la terre se désagrège finement en surface.

B.3.3.5 Protection de la stabilité structurale

La **stabilité structurale** peut être maintenue par plusieurs actions :

- installer un couvert végétal, enherber ;
- protéger le sol par un mulch ;
- ne pas labourer en hiver sur sol battant ;
- éviter les excès de terre fine lors de la préparation du sol ;
- maintenir suffisamment de mottes en surface pour les cultures d'hiver ;
- éliminer les excès d'eau par drainage, etc.

B.4 La porosité dépend de la texture et de la structure du sol

B.4.1 Définition de la porosité - Valeur de la porosité

Entre les éléments structuraux subsistent des pores qui assurent le stockage et la circulation de l'air, de l'eau et des racines. Les pores du sol de forme et de dimension variables forment un réseau plus ou moins interconnecté qui constitue l'**espace poral**.

La **porosité** est le **volume de vide en % du volume total**.

La porosité totale comprend la **macroporosité** - espace rempli d'air correspondant aux pores de diamètre supérieur à 10 µm - et la **microporosité** - espace rempli d'eau.

Les pores ont les **deux origines texturale et structurale**.

La porosité peut représenter 30 à 33 % du volume total des sols. Il s'agit d'une **donnée caractéristique de l'état physique** d'une couche donnée du terrain.

B.4.2 Porosité texturale

La **porosité texturale** est directement liée à la **texture** du sol. Elle résulte de l'**assemblage des particules élémentaires**.

Elle n'est **pas modifiable**, contrairement à la porosité structurale.

B.4.3 Porosité structurale

La **porosité structurale** dépend de la **structure** du sol. Elle résulte de l'**association des agrégats entre eux**. Elle est modifiable par les interventions sur le sol.

La porosité structurale permet à l'**eau** et à l'**air** de diffuser dans le sol. Plus la porosité structurale est élevée plus le **transfert de l'eau**, et donc la **conductivité hydraulique**, sont facilités.

B.5 Les caractéristiques physiques du sol : humidité, température, aération, chaleur

B.5.1 L'humidité

B.5.1.1 La teneur en eau du sol ou l'humidité

La **teneur en eau du sol** ou **humidité** est égale au rapport de la quantité d'eau à celle de terre sèche la renfermant.

On caractérise également l'eau du sol par le potentiel capillaire ou pF qui mesure la force de succion de l'eau par le sol.

B.5.1.2 Les forces s'exerçant sur l'eau du sol : gravité, succion racinaire, succion de la terre

Différentes forces s'exercent sur l'eau du sol.

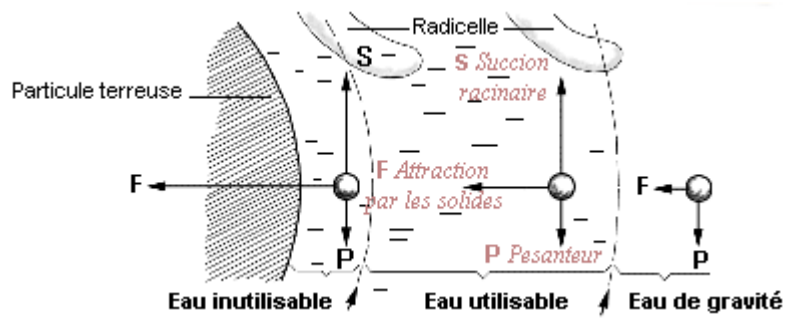
La **succion de l'eau par la terre** est d'autant plus importante que les molécules d'eau sont proches de la terre fine.

Quand la distance entre eau et particule terreuse est importante, la pesanteur est supérieure à la force de succion du sol : l'eau s'écoule alors par **gravité**.

La plante prélève de l'eau par **succion racinaire** : ce prélèvement a lieu lorsque la force de succion racinaire est supérieure à la force de succion du sol.

B.5.1.3 Les différents états de l'eau

L'eau dans le sol se trouve sous trois états :



Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

- l'**eau de gravité**, elle occupe la **macroporosité du sol**, elle s'écoule rapidement, puis de plus en plus lentement, elle quitte les espaces vides qui se remplissent d'air. Lorsque l'eau ne s'écoule plus, la terre atteint son **taux d'humidité à la capacité au champ** ;

- l'**eau utilisable par la plante**, partie de l'eau ainsi retenue par le sol ;

- l'**eau inutilisable par la plante** : eau formant autour des solides des films très minces et retenue énergiquement par la terre. Elle occupe la **microporosité**, il s'agit de l'**eau de rétention**. Lorsque les plantes ne peuvent plus absorber l'eau, c'est-à-dire lorsque la force de succion de la terre est supérieure à celle des racines, le **point de flétrissement permanent** est atteint ; ce stade est irréversible.

B.5.1.4 L'état physique du sol conditionne les caractéristiques hydriques

B.5.1.4.1 L'humidité à la capacité au champ d'un sol

Lorsque l'**eau de gravité** qui occupait la macroporosité s'est écoulée, le sol a atteint son **taux d'humidité à la capacité au champ**. Le sol est **ressuyé**.

La capacité au champ traduit sa **capacité de rétention de l'eau** : seul l'espace microporal est occupé.

Lorsque il y a **excès d'eau**, l'humidité est supérieure au taux d'humidité à la capacité au champ.

B.5.1.4.2 L'humidité au point de flétrissement

Au **point de flétrissement** correspond l'humidité du sol telle que les plantes ne peuvent plus absorber d'eau. La conséquence sur la plante est le **flétrissement**, **état irréversible**.

B.5.1.4.3 L'humidité équivalente

L'**humidité équivalente** est la quantité d'eau que peuvent théoriquement prélever les racines.

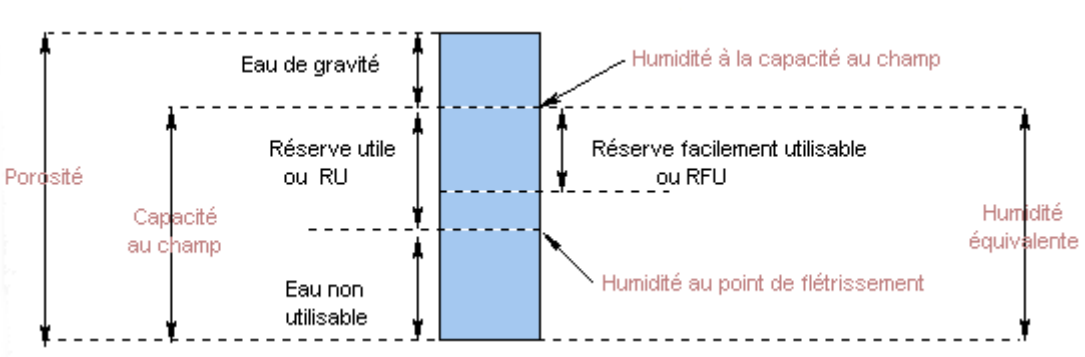
Elle correspond à la différence : **Capacité au champ - Point de flétrissement**.

B.5.1.4.4 La Réserve Utile (RU) et la Réserve Facilement Utilisable (RFU)

La **RU ou réserve** utile est la fraction d'humidité du sol accumulée pendant l'hiver et disponible pour la plante.

La **RFU ou réserve facilement utilisable** par les plantes est proportionnelle à la RU : **RFU = k x RU**, k dépend de la profondeur d'enracinement du peuplement et de l'importance de la demande climatique. Généralement on retient pour k une valeur voisine de 2/3.

La RFU d'un sol est d'autant plus importante que le sol est profond ainsi que l'enracinement, et que les pluies hivernales ont été importantes.

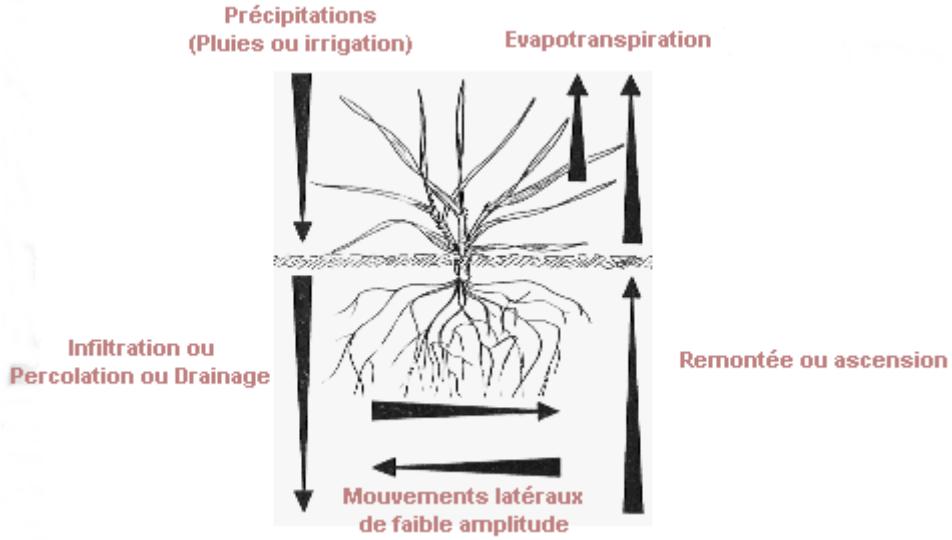


Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

B.5.1.4.5 L'état structural conditionne tous les déplacements de l'eau

B.5.1.4.5.1 Les différents mouvements de l'eau dans le sol

L'eau qui arrive au sol est l'objet de différents mouvements :



Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

B.5.1.4.5.2 Infiltration : notions de sols perméables et imperméables

L'**infiltration ou percolation** est la descente de l'eau sous l'effet de la pesanteur.
La **perméabilité du sol ou conductivité hydraulique** est la vitesse d'infiltration.

Elle dépend de la **texture** mais surtout de la **structure du sol** : plus la quantité d'éléments ronds et de même taille est importante et plus le sol est perméable. En revanche, si le sol est constitué d'éléments de tailles différentes, imbriqués les uns dans les autres, la porosité est faible, et le sol peu perméable.

Les sols où la vitesse d'infiltration est élevée, ou **sols perméables** sont les sols filtrants (à structure grossière), les sols à structure fragmentaire, ou les sols humifères. En revanche les sols à structure fine et pauvres en argile (sols battants), les sols argileux dépourvus d'humus et de calcaire, et les sols reposant sur un horizon imperméable sont des **sols imperméables**.

L'infiltration peut provoquer le **lessivage**, entraînement des éléments solubles vers le bas tels que les nitrates, les sels de calcium. Il y a ainsi perte d'éléments nutritifs pour la plante et dégradation de l'environnement (nitrates).

B.5.1.4.5.3 Filtration ou drainage

La **filtration ou drainage** est l'écoulement de l'eau dans un sol saturé (lorsque l'eau occupe l'ensemble de la porosité), le déplacement se fait par les macropores.

B.5.1.4.5.4 Diffusion

La **diffusion capillaire** de l'eau dans le sol n'est pas liée à la pesanteur mais à des différences d'humidité entre deux endroits du sol. La remontée capillaire de l'eau dans le sol se traduit par le **déplacement de l'eau de rétention d'un endroit plus humide vers un endroit moins humide** : l'évaporation en surface crée un appel d'eau qui provoque cette diffusion de l'eau.

L'eau se déplace dans le sol à l'état de films formés de molécules d'eau liées entre elles. Le transfert est d'autant meilleur que la cohésion et la continuité des films d'eau est assurée. La vitesse de diffusion diminue avec la teneur en eau du sol ; le film d'eau entourant les particules du sol étant d'autant plus mince que le sol est sec.

B.5.2 La température dépend de l'absorption de la chaleur

Le **rayonnement solaire** est la source principale de la chaleur du sol.

La **température d'un sol** dépend de l'inclinaison du terrain, de la rugosité du relief, de la composition minéralogique, de la couleur et de l'humidité du sol.

La température du sol conditionne les **activités microbienne** et **racinaire**.

Les **sols les plus froids** sont ceux engorgés d'eau, les **sols les plus chauds** sont les sols perméables.

B.5.3 L'aération du sol dépend de l'état structural et de l'état hydrique

Le **renouvellement de l'air** est principalement assuré par diffusion : de l'oxygène diffuse de l'air extérieur vers le sol, du gaz carbonique du sol vers l'extérieur.

L'**aération** conditionne les **activités microbienne** et **racinaire**.

L'état structural et l'état hydrique conditionnent ces échanges en déterminant la configuration des pores et l'importance de l'espace poral libre.

Une **croûte de battance** à la surface d'un sol diminue la perméabilité du sol à l'air. Egalement, des pores remplis d'eau (lorsqu'il y a **engorgement**) limitent les possibilités de diffusion (exemple : la diffusion de l'oxygène est 10000 fois plus lente en phase liquide qu'en phase gazeuse).

C LES CONSTITUANTS CHIMIQUES DU SOL ET LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

C.1 Les processus physico-chimiques : le pouvoir adsorbant du complexe argilo-humique (CAH)

C.1.1 Le pouvoir adsorbant des colloïdes

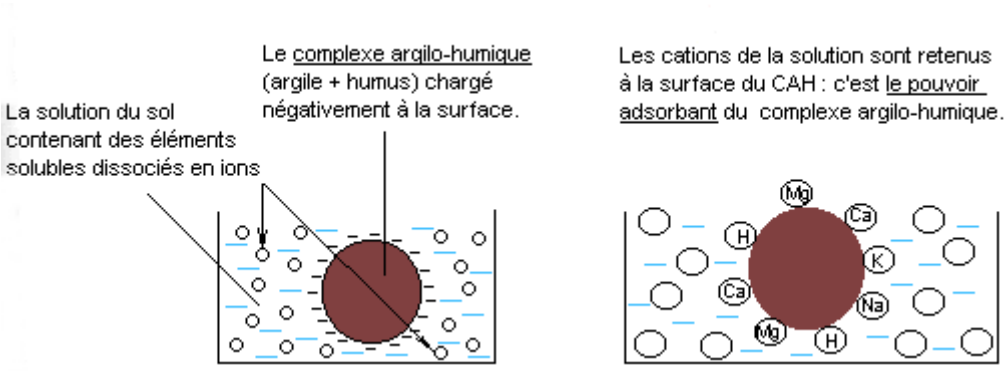
C.1.1.1 Le complexe argilo-humique retient des ions à sa surface

L'**adsorption** est la rétention de substances sans combinaison à la surface de constituants solides. La **désorption** est le phénomène inverse.

L'adsorption des ions s'explique par l'existence de charges électriques contraires qui s'attirent.

Le **complexe argilo-humique**, chargé négativement à sa surface, a la capacité de retenir à sa surface des cations provenant de la solution du sol : c'est le **pouvoir adsorbant**. Un équilibre s'établit entre les ions adsorbés et les ions libres de la solution.

Ces cations sont momentanément fixés, ils peuvent être échangés, par le phénomène de désorption, avec la solution. A chaque instant se désorbe autant d'ions qu'il ne s'en adsorbe.



Processus d'adsorption des ions sur le complexe adsorbant

Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

C.1.1.2 L'adsorption des ions est sélective

L'**adsorption des ions** sur le complexe argilo-humique est **sélective**, sont adsorbés - désorbés :

- les protons H^+ (ou H_3O^+)
- les ions métalliques Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+
- en quantité plus limitée, les ions NH_4^+, Mn^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Mo, Al^{3+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}.

C.1.2 La capacité d'échange des cations (CEC) dépend du complexe adsorbant

C.1.2.1 La capacité d'échange en cations (CEC)

La **capacité d'échange en cations (CEC)** est la quantité maximale de cations de toutes sortes qu'un poids déterminé de sol peut retenir. Elle joue un rôle fondamental pour l'alimentation minérale de la plante.

La CEC dépend du taux et de la nature des colloïdes argilo-humiques du sol (elle est exprimée en centimoles$^+$ pour 1 kg de terre prélevée).

Nature des colloïdes	CEC en cmol$^+$/ kg de terre
Argiles	3 à 150
Humus	300 à 500
Matière organique peu humifiée	100

Elle est **élevée pour les sols argileux et humifères**, le nombre de complexes argilo-humiques au **pouvoir adsorbant** étant élevé, et faible pour les sols sableux.

L'apport d'amendements humiques augmente ainsi la CEC du sol.

La charge cationique que peut retenir le complexe adsorbant varie en fonction du pH ; en effet les sites négatifs du complexe adsorbant peuvent être neutralisés par des protons H^+ : le sol s'acidifie et la CEC liée à l'humus diminue.

C.1.2.2 Le taux de saturation du complexe adsorbant

La **CEC** est occupée par les cations Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ (cations échangeables) ainsi que par H^+, Al^{3+} et Fe^{3+} (ions générateurs d'acidité). S étant la somme des cations échangeables et la CEC la capacité d'échange totale :
V=100 x S/CEC est le **taux de saturation**.

Un sol saturé ne renferme pas de protons H^+ et est riche en cations.

On recherche un taux de saturation **supérieur à 50** pour assurer une **bonne alimentation à la plante**.

C.1.2.3 Le pouvoir alimentaire du sol ou offre potentielle des éléments

Le **pouvoir alimentaire du sol** est son aptitude à assurer un flux d'ions suffisamment entretenu pour permettre l'alimentation continue de la plante.

Il dépend de trois facteurs :

- un **facteur quantitatif** : il s'agit de la réserve assimilable qui regroupe les éléments présents dans la solution et ceux adsorbés sur le complexe argilo-humique ;

- un **facteur qualitatif** : il s'agit de l'énergie de rétention de l'ion sur le complexe argilo-humique ;

- la **mobilité de l'ion ou vitesse de désorption**, c'est-à-dire sa capacité à rétablir l'équilibre ionique sol - solution suite à un prélèvement d'ions par les végétaux.

C.1.2.4 Les ions adsorbés sont échangeables avec la solution

Les cations fixés sur le complexe argilo-humique peuvent être échangés avec la solution du sol, ainsi dissous ils peuvent être absorbés par les racines de la plante.

Cette propriété du complexe argilo-humique permet au sol :

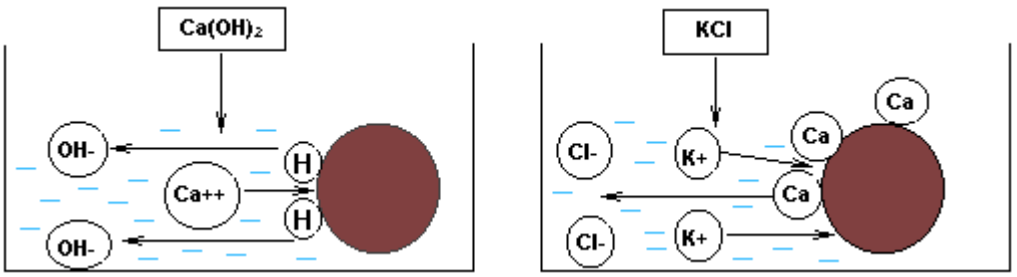
- d'accroître sa CEC et d'assurer une réserve de cations, éléments nutritifs de la plante ;
- de limiter le lessivage des ions ;
- de régulariser la composition ionique de la solution.

L'**échange de cations** se fait ainsi :
- remplacement des ions H^+ du complexe argilo-humique par des ions Ca^{2+}, suite à un **apport de chaux** par exemple : $CaOH \leftrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$

Les ions Ca^{2+} libérés vont se fixer sur le complexe argilo-humique en remplaçant 2 ions H^+ :
$Complexe\text{-}H + Ca^{2+} \leftrightarrow Complexe\text{-}Ca + 2\ H_2O$

- remplacement des ions Ca^{2+} du complexe argilo-humique par des ions K^+ , après apport d'engrais potassique KCL : $KCL \leftrightarrow K^+ + Cl^-$

2 K^+ sont alors échangés avec un Ca^{2+} sur le complexe, ces derniers s'associent aux ions Cl^-, le CaCl ainsi formé peut être lessivé : il s'agit de l'**action décalcifiante des engrais potassiques**.



Apport de chaux — Apport d'engrais potassiques

Source : Les bases de la production végétale. SOLTNER

C.1.2.5 Facteurs des échanges des cations entre le complexe argilo-humique et la solution

L'échange des cations entre le complexe argilo-humique et la solution est la conséquence de l'**agitation des ions** autour des micelles d'argile et d'humus.

Ces échanges se poursuivent jusqu'à l'obtention d'un **équilibre** entre les cations libres de la solution et ceux retenus sur le complexe argilo-humique. Les échanges font suite à des variations de concentration.

Les processus responsables de la variation de la quantité de cations dans la solution du sol sont :

- le lessivage d'ions ;

- le prélèvement d'ions par les plantes ;
- l'altération de la roche-mère (libération d'ions dans la solution) ;
- l'apport d'engrais et d'amendements (apport d'ions dans la solution) ;
- l'évolution de la matière organique dans le sol (libération d'ions dans la solution).

C.2 Réaction du sol : pH et variation

C.2.1 Le pH : l'indicateur de l'ambiance ionique du sol

Le **pH de la solution** traduit la concentration de protons H_3O^+ (simplification H^+) dans la solution du sol par la relation $[H_3O^+]=10^{-pH}$.

Le pH rend compte de l'acidité du sol qui se compose de l'**acidité actuelle** et de l'**acidité potentielle**.

Le **pH_{eau}** rend compte de l'**acidité actuelle ou réelle** : c'est l'acidité des protons dissociés présents dans la solution du sol.

L'**acidité potentielle** est représentée par les protons H^+ de la solution et ceux adsorbés sur le complexe argilo-humique et pouvant être échangés. Elle est mesurée par le **pH_{KCL}**.

La **différence pH_{eau} - pH_{KCL}** traduit donc l'importance des **ions H^+ présents sur le complexe argilo-humique**, elle est en relation avec l'**état de saturation du sol**.

Echelle de pH :

pH ≤ 5	5 < pH ≤ 6	6 < pH ≤ 6,6	6,6 < pH ≤ 7,4	7,4 <pH ≤ 7,8	pH > 7,8
fortement acide	franchement acide	légèrement acide	neutre	légèrement alcalin ou légèrement basique	alcalin ou basique

Le **pH** est utilisé comme **indicateur de l'ambiance ionique du sol**.

Il intervient dans l'étude de nombreuses propriétés du sol :

- une forte acidité ou un pH très faible entraîne des problèmes de **solubilité** ou d'**insolubilisation** des phosphates ;
- dans les sols calcaires à pH élevé, des phosphates de faible solubilité se forment et la **biodisponibilité des oligo-éléments** (sauf pour le molybdène) est diminuée.

C.2.2 Le pH intervient dans l'étude des propriétés physiques des sols

Les **propriétés physiques** du sol dépendent également du **pH** du sol : en sols limoneux, la **stabilité structurale** est minimale pour un pH compris entre 6 et 7, elle est améliorée en sols battants, si le pH atteint 7,6.

C.2.3 Les variations de pH et le pouvoir tampon

C.2.3.1 Le pH du sol varie

Le pH du sol varie en fonction :

- de la **nature du sol** ;
- de la **saison**. Le pH varie d'une demi-unité au cours de l'année, il est minimum en été et maximum en hiver ;
- de l'**intensité culturale**. Le sol a tendance à se décalcifier et à s'acidifier avec le temps.

C.2.3.2 Le pouvoir tampon : capacité des sols à s'opposer aux variations de pH

L'acidité potentielle confère au sol un **effet tampon** qui s'oppose aux brusques variations de pH.

Si l'on apporte des ions H^+ dans la solution, dans un premier temps le pH diminue puis remonte : une partie des protons vont se fixer sur le complexe argilo-humique.

Au contraire, si le nombre de protons de la solution diminue (par association avec des OH^- pour donner des molécules d'eau), des protons du complexe argilo-humique vont se désorber, le pH qui avait augmenté au début diminue.

C.3 Principaux éléments chimiques : N, P, K - Ca, Mg, S, Na et les oligo-éléments

C.3.1 Différents états des éléments dans le sol et le potentiel alimentaire du sol

C.3.1.1 Les ions sont soit à l'état libres, fixés ou adsorbés

Les **éléments nutritifs de la solution du sol** sont présents soit sous forme :

- d'**ions libres** dans la solution ;
- **adsorbés sur le complexe argilo-humique**, facilement échangeables avec la solution ;
- **rétrogradés** c'est-à-dire fixés entre les feuillets d'argile, et donc difficilement échangeables ;
- **associés à des molécules organiques** avec lesquelles ils forment des chélates (association entre un élément minéral et un constituant organique), facilement échangeables ;
- **inclus dans les molécules organiques**, insolubles.

C'est surtout à l'**état soluble** que les éléments minéraux jouent leur **rôle actif dans la nutrition de la plante**.

C.3.1.2 Le déplacement des éléments nutritifs dans le sol

Les éléments à l'état dissous se déplacent dans le sol selon deux modes :

- par **convection ou « mass-flow »** : l'élément est entraîné par le flux d'eau ;
- par **diffusion** : l'élément se déplace suite à une différence de concentration au sein de la solution.

Ces déplacements interviennent au moment de l'**absorption racinaire**.

C.3.1.3 Biodisponibilité des éléments et pouvoir alimentaire du sol

La **biodisponibilité** d'un élément est son aptitude à rejoindre la solution du sol en un temps compatible avec la vitesse d'absorption racinaire.

L'absorption d'un élément par les racines crée une différence de concentration de l'élément au sein de la solution. Ceci est à l'origine du transfert de cet élément par diffusion à partir des réserves riches en éléments nutritifs vers la racine.

Pour répondre aux besoins de la plante, le sol doit présenter une **offre potentielle ou un potentiel alimentaire** suffisant (aptitude à réalimenter sa phase liquide).

C.3.2 Les nutriments dans le sol

C.3.2.1 Les principaux cations métalliques : calcium, magnésium, potassium, sodium

C.3.2.1.1 Le calcium Ca dans le sol

C.3.2.1.1.1 Les formes du calcium dans le sol

Le **calcium** se trouve **dans le sol** sous plusieurs formes :

- le **calcaire inactif** est le **carbonate de calcium ($CaCO_3$)** à l'état grossier (blocs, graviers,...). Sous l'action de l'eau et de CO_2, il peut être dissout et fournir des ions Ca^{2+} dans la solution du sol :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca(HCO_3)_2 \Leftrightarrow 2HCO_3^- + Ca^{2+}$$

le carbonate est altéré et disparaît par décarbonatation, mais la dissolution du carbonate dans l'eau est très faible ;

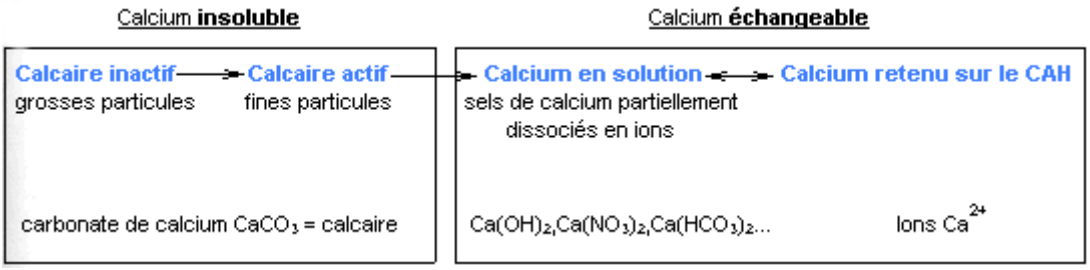
- le **calcaire actif** est la fraction de carbonate de calcium ($CaCO_3$) qui s'altère rapidement ;

- le **calcium soluble** se trouve dans la solution sous diverses formes qui libèrent des ions Ca^{2+} : la chaux $Ca(OH)_2$, le bicarbonate de calcium $Ca(HCO_3)_2$, le nitrate de calcium $Ca(NO_3)_2$, les phosphates monocalciques $Ca(H_2PO_4)_2$;

- le **calcium échangeable** : ions calcium adsorbés sur le complexe argilo-humique et libres dans la solution du sol. Il existe un équilibre d'adsorption - désorption entre eux.

La teneur en calcium sous ces diverses formes définit l'**état calcique du sol**.

L'analyse chimique permet de doser le **calcaire actif**, le **calcaire total** et la teneur en **ions calcium Ca^{2+}**.



C.3.2.1.1.2 La teneur en calcium varie selon les sols

La teneur en calcium est variable d'un sol à un autre :

- dans les **sols calcaires**, le taux de $CaCO_3$ est supérieur à 2%. En général le CaO échangeable est important et le complexe argilo-humique est saturé. L'excès de calcium peut entraîner des blocages d'autre éléments minéraux ;

- dans les **sols non calcaires mais bien pourvus en calcium échangeable**, un simple entretien en calcium est nécessaire pour assurer une teneur correcte en calcium ;

- dans les **sols non calcaires et pauvres en calcium échangeable**, le complexe est insaturé, ce sont les sols acides.

C.3.2.1.1.3 L'état calcique du sol

C.3.2.1.1.3.1 Etat calcique et pH

Les quantités de calcium présentes sous chaque forme, à un moment donné, définissent l'**état calcique** du sol.

Ces quantités varient en **fonction du pH** du sol. Plus les protons H^+ adsorbés sont nombreux (lorsque le pH est faible), moins il y a d'ions calcium : le complexe est désaturé. En revanche les sols calcaires ont un pH élevé.

C.3.2.1.1.3.2 Le calcium et les propriétés physico-chimiques du sol

En floculant les argiles, le calcium augmente la stabilité structurale du sol, ainsi que sa perméabilité.

Le calcium intervient également dans les processus physico-chimiques : moyennement retenu sur le complexe adsorbant, il peut s'échanger avec d'autres ions libres de la solution K^+, Mg^{2+}, etc.

En revanche, un excès de calcium occasionne des inconvénients :

- l'insolubilisation de composés phosphatés ;
- le blocage d'oligo-éléments ;
- l'imprégnation des racines entraînant une baisse du fonctionnement racinaire ;
- l'enrobage de la matière organique qui bloque sa minéralisation.

C.3.2.1.1.4 Evolution de l'état calcique

Au cours du temps, **l'état calcique dans le sol évolue** selon trois processus :

- **la décarbonatation** : c'est la dissolution des carbonates en présence d'eau et de gaz carbonique, avec libération d'ions Ca^{2+}. La décarbonatation est d'autant plus importante que le taux de calcaire actif est élevé. On considère en général une perte annuelle de 800 à 1000 kg/ha de $CaCO_3$ ou de 450 à 600 kg/ha en CaO : la teneur de $CaCO_3$ du sol diminue d'environ 0,3% par an ;

- **la décalcification** : c'est la désorption des ions Ca^{2+} du complexe adsorbant, échangés avec d'autres ions que des protons, puis lessivage des ions Ca^{2+}. La décalcification est conditionnée par la quantité d'engrais apportée ;

- **l'acidification** : c'est la désorption des ions du complexe adsorbant, échangés avec des protons.

Les processus d'acidification et de décalcification ont lieu dans les sols engorgés.

L'évolution de l'état calcique dépend :

- du **lessivage du calcium** : il dépend du drainage et du calcium présent dans la solution. Dans les eaux drainées, le calcium est le principal ion qui accompagne les anions non retenus NO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^- etc. dans leur déplacement ;

- des **exportations des cultures** : elles sont en général assez faibles. Les exportations correspondent à la quantité d'éléments nutritifs absorbés par les plantes qui quittent la parcelle au moment de la récolte ;

- de l'**action des engrais** sur l'état calcique : en apportant des ions neutres, acides ou basiques, les engrais ont des effets acidifiant ou alcalinisant. Tous les engrais ammoniacaux sont acidifiants ; les engrais potassiques sont décalcifiants.

C.3.2.1.1.5 Diagnostic de l'état calcique

Le **manque de calcium** dans le sol se manifeste ainsi :

- la structure du sol devient compacte et instable ;
- les matières organiques se décomposent mal ;
- les rendements diminuent ;
- une végétation acidophile (fougère, rumex, digitale,...) se développe.

L'**analyse de terre** permet de déterminer le manque de calcium :

- la mesure du pH révèle l'acidité du sol, si la différence pH_{KCL} - pH_{eau} est supérieur à 0,5 unité de pH, le complexe est insaturé ;
- la teneur souhaitable de calcaire est fonction du taux d'argile et de matière organique :

CaO souhaitable (en mg/kg de terre) = 100*A% + 500*MO%

A% : pourcentage d'argiles dans le sol.
MO% : pourcentage de matière organique dans le sol.

La **présence de calcaires** dans le sol se révèle ainsi : sur le terrain, si après avoir versé de l'acide chlorhydrique sur le sol, il se produit une **effervescence**, la teneur en carbonates est supérieure à 1%.

C.3.2.1.1.6 L'état calcique est modifié par l'apport d'amendements calcaires

Lorsque l'état calcique d'un sol est trop faible, lorsque le pH est trop faible, l'apport d'ions calcium sur le complexe argilo-humique s'impose.
On peut modifier l'état calcique d'un sol par l'apport d'**amendements calcaires** (dont le chaulage).

Le **chaulage** permet de **relever le pH du sol** :

¤ Le **chaulage de redressement** est à faire lorsque le pH est très inférieur au pH optimum : la dose d'amendement à apporter est élevée.

Pour relever le pH d'une unité, il est nécessaire d'apporter :
- en terres sableuses (10% argile) : 1500 à 2000 kg de CaO
- en terres limoneuses (20% argile) : 2000 à 3000 kg de CaO
- en terres fortes et humifères (30% argile) : 3000 à 4000 kg de CaO

Il ne faut pas relever le pH trop rapidement : de ¼ à ½ unité à la fois.

¤ Le **chaulage d'entretien** est destiné à compenser la perte annuelle de 450 à 600 kg/ha de CaO. L'apport à envisager tous les 4 à 5 ans est d'environ 3 tonnes en amendement pur.

C.3.2.1.2 Le magnésium Mg dans le sol

C.3.2.1.2.1 Formes du magnésium dans le sol

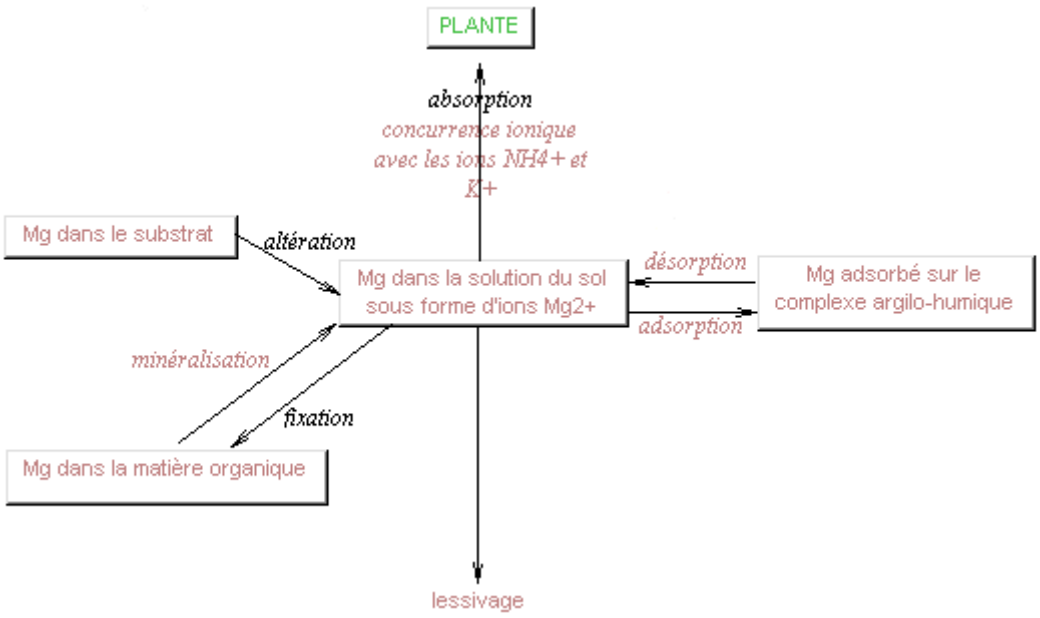
Le **magnésium** est présent dans le sol sous plusieurs formes :

- une **réserve inaltérée** : magnésium présent dans le substrat, dans les minéraux primaires silicatés ;

- une **réserve mobilisable** : magnésium des oxydes et hydroxydes. Ce magnésium peut passer sous forme échangeable, à la hauteur d'environ 15 kg de MgO/ha/an ;

- le **magnésium échangeable** : adsorbé sur le complexe argilo-humique, il représente environ 0,05 à 0.10‰ de MgO ;

- le magnésium présent dans la solution du sol sous forme d'**ions Mg^{2+}** : environ 5 à 100 mg de MgO/l de solution.



Magnésium échangeable et magnésium en solution sont les deux formes qui servent à alimenter les plantes.

La teneur totale en magnésium du sol varie de 1 à 30‰ en MgO.

Le magnésium est **faiblement retenu sur le complexe argilo-humique**. Sa rétention limitée explique l'appauvrissement des couches superficielles du sol et l'importance des pertes par drainage.

La richesse en magnésium est définie par l'analyse chimique de terre (teneur en MgO). Le taux souhaitable de MgO est fonction de la teneur en argile.

C.3.2.1.2.2 Conséquences agronomiques d'une carence en magnésium

Les sols contiennent très généralement suffisamment de magnésium pour satisfaire le besoin des plantes. Cependant il existe des **carences en magnésium** décelables au niveau de la plante. La carence de magnésium la plus courante au niveau de la plante est celle induite par un excès de K^+, Ca^{2+}, NH_4^+ ou si l'acidité est trop élevée. Elle se manifeste par une **chlorose sur les feuilles âgées**, avec décoloration de la partie médiane.

Les apports de magnésium peuvent se faire par apports d'amendements calcaires et magnésiens (18 à 40% de MgO) à l'occasion d'un chaulage, par l'apport de sulfate magnésien, ou par pulvérisation foliaire d'engrais magnésiens lorsqu'une carence en magnésium est décelée en cours de végétation (sauf sur maïs et céréales à paille).

C.3.2.1.3 Le potassium K dans le sol

C.3.2.1.3.1 Formes du potassium dans le sol

Le **potassium** est présent dans le sol sous plusieurs formes :

- le **potassium solidement fixé dans les minéraux primaires**. Cette forme ne participe pas à l'alimentation de la plante ;

- le **potassium associé à l'argile** : la quantité fixée ou rétrogradée entre les feuillets d'argile est difficilement échangeable ;

- le **potassium adsorbé sur le complexe argilo-humique** est facilement échangeable ;

- le potassium présent dans la solution du sol sous forme d'**ions K^+.**

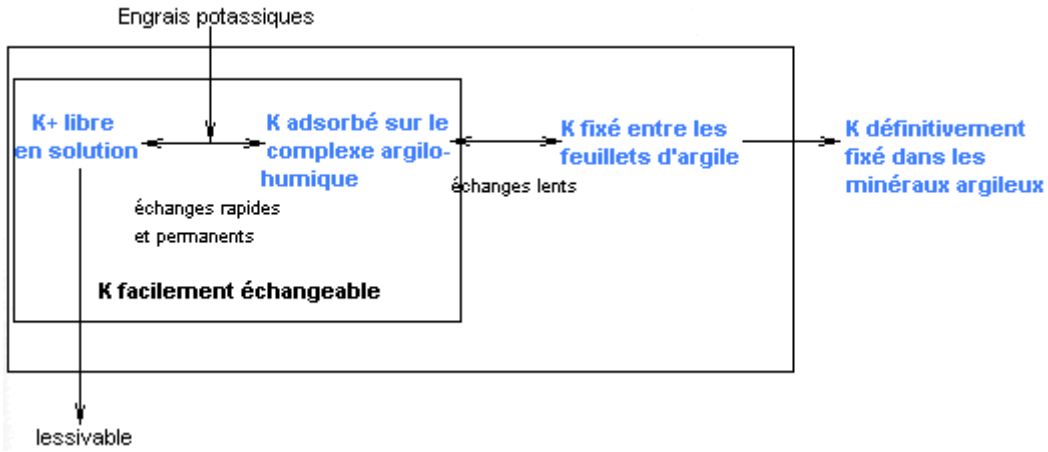
Potassium échangeable et potassium en solution sont les deux formes qui servent à alimenter les plantes.

La teneur totale en potassium du sol varie de 1,5 à 3 % de K_2O, mais la connaissance de la teneur totale a peu d'intérêt quant à l'alimentation des plantes. Il existe des pertes de potassium par drainage.

La richesse en potassium échangeable est définie par l'analyse chimique de terre (teneur en K_2O). Le taux souhaitable de K_2O est fonction de la teneur en argile.

C.3.2.1.3.2 Dynamique d'échange du potassium

Dans le sol, toutes les formes de potassium sont liées et forment le **système sol - potassium**. Les ions passent d'un état à l'autre : il s'agit de la **dynamique du potassium** dont les transferts sont résumés par le schéma :



C.3.2.1.4 Le sodium Na dans le sol

Le **sodium** dans le sol est sous forme :

- le **sodium inclus dans le substrat**. Cette forme ne participe pas à l'alimentation ;
- le **sodium adsorbé sur le complexe argilo-humique**. Dans les sols cultivés, les ions Na^+ représente moins de 1% de l'ensemble des cations adsorbés sur le complexe adsorbant. Il est facilement échangeable ;
- le sodium libre dans la solution du sol sous forme d'**ions Na^+.**

Les **formes soluble et adsorbée** participent à l'alimentation de la plante.

C.3.2.2 Les trois principaux anions : azote, phosphore, soufre

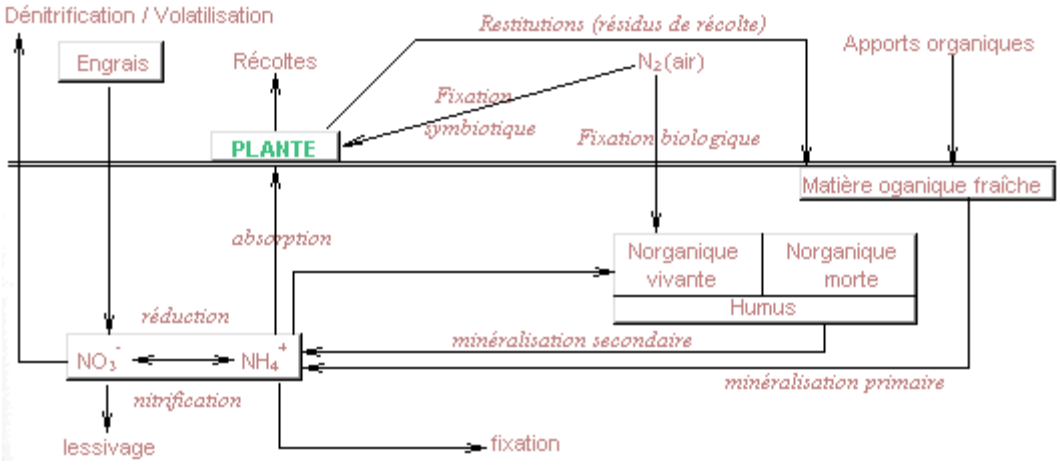
C.3.2.2.1 L'azote N dans le sol

C.3.2.2.1.1 Formes de l'azote dans le sol et le cycle de l'azote

L'**azote** est sous trois formes dans le sol : **élémentaire**, **minérale** et **organique** (96 à 98 % de l'azote total).

Le sol contient 2 à 3 ‰ d'azote total, soit 5 à 7,5 t/ha.

Les principales transformations subies par l'azote sont rappelées par le **cycle de l'azote** :



C.3.2.2.1.2 L'azote organique

L'**azote organique** comprend :

- l'azote organique des **résidus de culture** : il constitue pour les micro-organismes hétérotrophes une source d'énergie et de nutriments ;

- l'azote organique de la **biomasse microbienne** (5 à 6 % de l'azote total) ;

- l'azote des **substances humiques** : il constitue la masse azotée la plus importante (2,5 à 5 tonnes d'azote organique/ha/an) et dépend des apports en amendements humiques et des conditions pédoclimatiques.

C.3.2.2.1.3 L'azote minéral

L'**azote minéral** est présent dans la solution du sol, il comprend :

- des **ions ammonium NH_4^+** libres dans la solution ou retenus sur le complexe argilo-humique ;
- des **ions nitrates NO_3^-** libres dans la solution. Ils peuvent être facilement lessivés ;
- des **ions NO_2^-** très rares.

La quantité d'azote minéral est variable, elle dépend du stock de matière organique et des conditions pédoclimatiques (30 à 300 kg d'azote minéral sont libérés /ha/an). L'**azote minéral** (NH_4^+ et NO_3^-) est la seule forme intéressante pour la **nutrition minérale** de la plante.

L'azote minéral a plusieurs origines : la minéralisation, la nitrification, les apports d'engrais minéraux azotés et les déplacements dans la solution du sol.

C.3.2.2.1.4 La minéralisation de l'azote

La **minéralisation de l'azote** est le **passage de l'azote de la forme organique à celle minérale**. Ce processus est effectué par les micro-organismes du sol.

La minéralisation est influencée par :

- la **nature des substances**. Les substances sont plus ou moins facilement minéralisables par les micro-organismes. On utilise le rapport C/N (carbone/azote) pour caractériser la biodégradabilité d'une substance. Les besoins des micro-organismes correspondent à un C/N compris entre 15 et 30. Si C/N<15, il y a minéralisation, si C/N>30 il y a organisation (passage de l'azote minéral à l'azote organique) ;

- les **conditions physico-chimiques et pédoclimatiques des sols**, qui influent sur l'activité microbienne et donc sur la minéralisation ;

- la **constitution du sol** : les propriétés physiques du sol, humidité, aération, chaleur, porosité...ont une influence sur l'activité biologique et donc sur la minéralisation.
- la **présence d'azote minéral** : un niveau élevé d'azote minéral stimule la décomposition initiale, en assurant les besoins azotés des micro-organismes.

C.3.2.2.1.5 Les pertes d'azote

Les **pertes d'azote minéral** sont le résultat de trois processus :

- le **lessivage hivernal** : les nitrates NO_3^- en solution sont lessivés ;
- la **réorganisation biochimique de l'azote minéral** : passage de la forme minérale à celle organique ;
- la **dénitrification** : transformation des nitrates NO_3^- en ammonium NH_4^+.

C.3.2.2.2 Le phosphore P dans le sol

C.3.2.2.2.1 Formes du phosphore dans le sol

Le **phosphore** est présent dans le sol sous plusieurs formes :

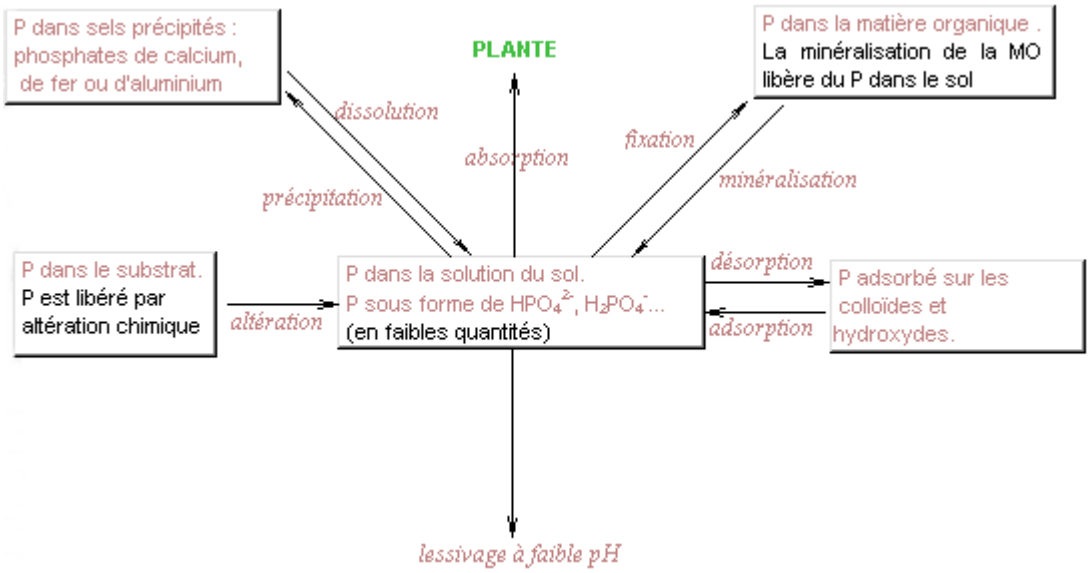
- le **phosphore insoluble** combiné dans des composés minéraux ;

- le **phosphore peu soluble** fixé ou rétrogradé entre les feuillets d'argile ;

- le **phosphore combiné à la fraction organique** : la minéralisation de la matière organique libère du phosphore ;

- le **phosphore adsorbé** : il est retenu soit par les charges positives des colloïdes minéraux et organiques, soit par les colloïdes électropositifs comme les hydroxydes de fer ou d'aluminium. Le processus d'adsorption est réversible ;

- les **ions phosphates libres** dans la solution du sol : leur présence dépend du pH. Principalement sous forme HPO_4^{2-} et $H_2PO_4^-$, ils sont présents en très faible quantité (moins de 1 kg/ha).



En sols cultivés, 1/3 du phosphore se trouve sous forme associée à la fraction organique et 2/3 sous forme associée à la fraction minérale.

C.3.2.2.2.2 Les problèmes d'assimilabilité du phosphore

Les plantes s'alimentent à partir des ions libres et très mobiles de la solution. Ces ions constituent la réserve, ou le pool alimentaire.

En présence de calcium, de fer, d'aluminium, etc., le phosphore se combine pour former des **phosphates**, **composés insolubles**. Le phosphore n'est plus disponible pour la plante, il n'est plus assimilable.

La **solubilisation des phosphates** est un phénomène assez complexe et **dépendant du pH**. Une forte acidité ou un pH très faible entraîne des problèmes de solubilité ou d'insolubilisation des phosphates.

Les phosphates peuvent se redissoudre mais avec des vitesses très faibles. La présence de matière organique dans le sol gêne l'évolution du phosphore vers ces formes phosphatées et ralentit ainsi la perte de mobilité du phosphore dans le sol.

C.3.2.2.2.3 L'état phosphate d'un sol

La plupart des sols renferment plusieurs tonnes de **phosphore** mais **moins de 0,1% est libre dans le sol**.

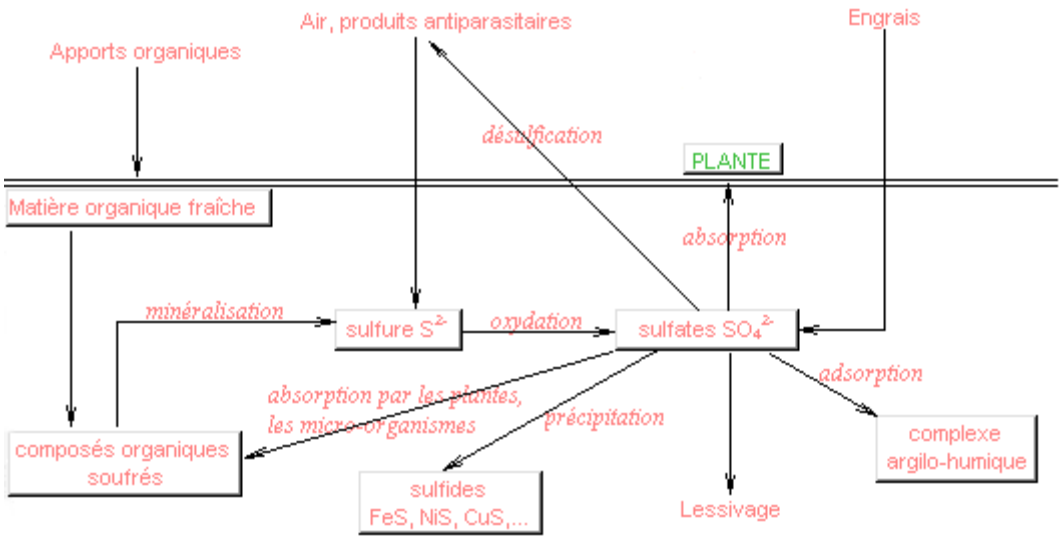
La richesse en phosphore assimilable (phosphore adsorbé et phosphore libre dans la solution) d'un sol est définie par l'analyse de terre dans la teneur P_2O_5 assimilable.

C.3.2.2.3 Le soufre S dans le sol

C.3.2.2.3.1 Formes du soufre dans le sol

Les sols renferment de 0,01 à 0,5 ‰ de soufre total, soit 300 à 2000 kg de S/ha, sous les formes organique et minérale.

Cycle du soufre



C.3.2.2.3.2 Forme organique du soufre et minéralisation

La majeure partie du soufre est sous forme organique (75 à 90%), forme non directement utilisable par les plantes.

Les composés organiques soufrés subissent une minéralisation par les micro-organismes. Le **soufre organique est minéralisé** en sulfates, assimilables par les végétaux. 20 à 80 kg de S/ha passent sous forme minérale par an.

C.3.2.2.3.3 Forme minérale du soufre

Le **soufre minéral** est sous forme de **sulfates** qui sont ou libres dans la solution du sol (SO_4^{2-}), ou adsorbés sur le complexe argilo-humique (très peu), ou inclus dans des composés peu solubles.

Les ions sulfates sont **facilement lessivables**, c'est pourquoi les couches superficielles du sol ont tendance à s'appauvrir en soufre. Les pertes par lessivage sont de 30 à 80 kg/ha/an.

C.3.2.2.3.4 Conséquences pour la nutrition soufrée

Les **carences en soufre** sont **rares**. En effet, les besoins annuels des cultures en soufre sont limités. Ils sont généralement satisfaits par la minéralisation.

C.3.2.3 Les oligo-éléments : fer, manganèse, zinc, cuivre, molybdène, bore

C.3.2.3.1 Les différents états des oligo-éléments dans le sol

Les **oligo-éléments** proviennent de l'altération de la roche-mère et de la minéralisation de la matière organique. Les principaux oligo-éléments sont le **fer**, le **manganèse**, le **zinc**, le **cuivre**, le **molybdène**, et le **bore**.

Ils sont présents dans le sol sous plusieurs états :

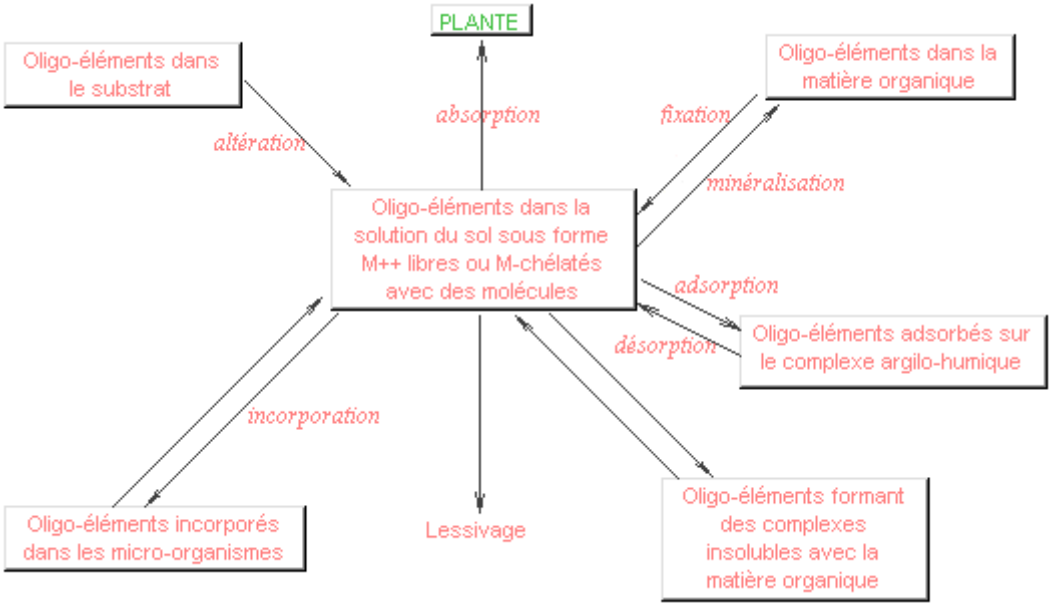
- **réserve inaltérée** ou lentement altérable : ils sont inclus dans la roche mère ou dans les grosses molécules de matière organique ;

- **forme mobilisable** dans les oxydes, hydroxydes et sulfures ;

- **forme échangeable** : ils sont adsorbés sur le complexe argilo-humique ;

- **forme présente dans la solution du sol** : ils sont soit libres dans la solution, soit sous forme chélatée.

Les chélates sont des complexes organo-métalliques très stables où l'ion est inséré dans une molécule organique. Les plantes peuvent absorber les oligo-éléments chélatés.
Ainsi, les chélates métalliques sont importants dans le sol car ils permettent d'augmenter la solubilité des cations métalliques oligo-éléments présents naturellement dans le sol ou ajoutés comme fertilisants.



Source des oligo-éléments dans le sol

Les **formes échangeable et en solution** des oligo-éléments sont les deux formes qui servent à alimenter les plantes.

C.3.2.3.2 Teneur du sol en oligo-éléments

Le tableau présente les teneurs du sol des principaux oligo-éléments (mg/kg de matière sèche ou ppm) :

	Sols	
	Elément total	**Elément échangeable**
Fer	10 000 - 50 000	
Manganèse	200 - 1 000	1 - 2
Zinc	10 - 100	0,2 - 0,5
Cuivre	8 - 40	0,2 - 0,5
Bore	5 - 80	0,1 - 0,5
Molybdène	1 - 10	0,1 - 0,2

Source : Techniques agricoles, Coppenet, INRA Quimper

C.3.2.3.3 Les facteurs de l'assimilabilité des oligo-éléments

La **quantité d'oligo-éléments disponibles pour la plante**, tels que les ions adsorbés facilement échangeables, les ions des complexes organo-minéraux moyennement stables, les ions solubles, **varie** en fonction :

- du **pH** : le pH est un des paramètres les plus importants de la disponibilité des oligo-éléments. L'augmentation du pH réduit la solubilité des oligo-éléments (sauf pour le molybdène) et donc leur absorption par les racines est diminuée. Le molybdène est d'autant plus assimilable par les plantes que le pH est élevé ;

- de l'**aération** : dans des conditions réductrices, c'est-à-dire en milieu pauvre en oxygène, lorsque le sol est engorgé, la solubilité des oligo-éléments augmente, ainsi que leur assimilabilité ;

- de la **teneur en matière organique** et de la **chélation** : la minéralisation de la matière organique libère des oligo-éléments, les sols pauvres en matière organique sont généralement pauvres en oligo-éléments ;

- des **interactions entre éléments nutritifs** : elles entraînent des carences induites ou des absorptions accrues. La plus grande influence provient du phosphore : une fertilisation phosphatée peut entraîner des réductions d'assimilation de fer, de cuivre ou de zinc ;

- des **techniques culturales** :

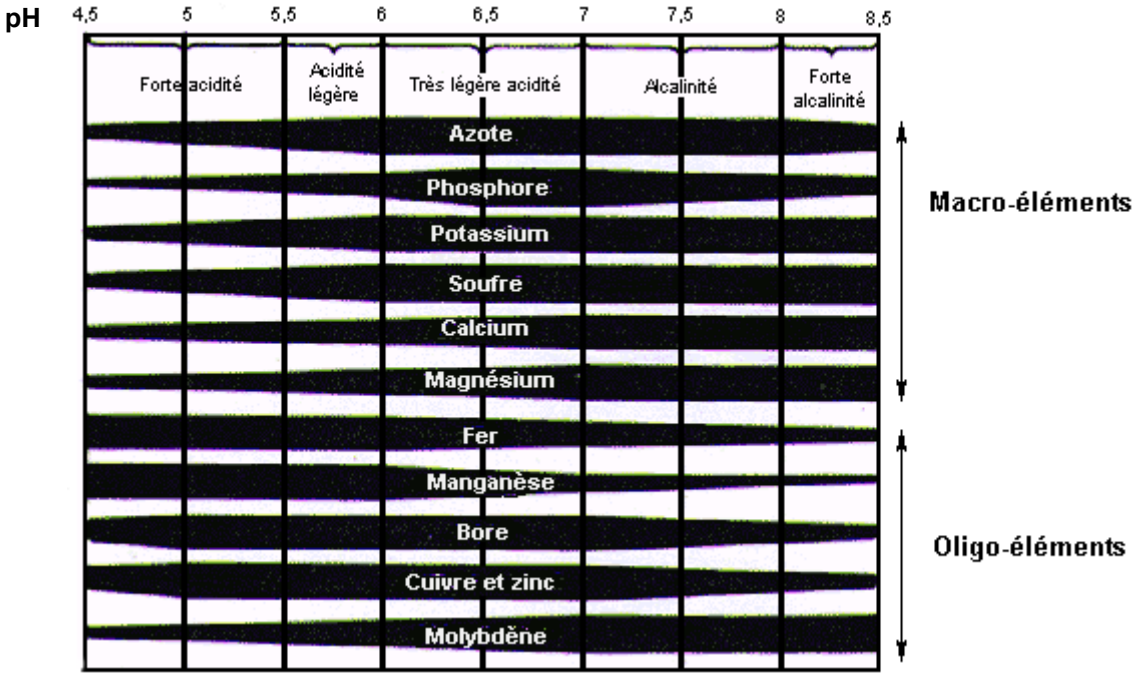
* un chaulage peut entraîner des déficiences en oligo-éléments : chaulage ⇒ augmentation de pH ⇒ diminution de l'assimilabilité ⇒ déficiences en oligo-éléments. Il est parfois nécessaire de prévoir un apport en oligo-éléments lors d'un chaulage ;

* en revanche, un chaulage peut parfois améliorer la nutrition du molybdène et diminuer les absorptions excessives du cuivre et du zinc ;

* les fumures organiques apportent des oligo-éléments ;

* certains engrais et produits phytosanitaires contiennent des oligo-éléments.

Assimilabilité des principaux éléments nutritifs en fonction du pH des sols



D LES ETRES VIVANTS DU SOL ET ASPECTS BIOLOGIQUES

D.1 Macro et microfaune du sol et leurs fonctions

D.1.1 Les principaux représentants de la macro et de la microfaune

La **macro-faune** du sol est constituée d'animaux de **taille supérieure à 2 mm**.
Les principaux représentants de la macro-faune du sol sont les **vers de terre** et les **arthropodes** (insectes, araignées, myriapodes). Ces animaux sont observables à l'œil nu dans un profil cultural.

La **microfaune** du sol est l'ensemble des animaux microscopiques de **taille inférieure à 2mm** .
Les principaux représentants de la microfaune du sol sont les protozoaires et les nématodes.

D.1.2 Les rôles de la faune du sol

D.1.2.1 Une action mécanique : amélioration de la stabilité structurale

Les **êtres vivants du sol** granulent le sol en le divisant ou en le cimentant.

Parmi eux les **vers de terre** créent des galeries verticales et horizontales, ce qui augmente la porosité structurale et donc accélère le drainage et l'aération. Leur tube digestif est le malaxeur de l'argile et de l'humus en un complexe argilo-humique qui soude les agrégats : la **formation d'agrégats stables** améliorent ainsi la stabilité structurale.

D.1.2.2 Une action chimique : enrichissement en minéraux assimilables

Les vers de terre ramènent à la surface des éléments minéraux : ils évitent ainsi le lessivage d'ions tels que le calcium. De plus leurs déjections sont plus riches en éléments K, P et Mg directement assimilables par la plante.

D.1.2.3 Une action biologique : stimulation de la flore microbienne

En consommant la flore microbienne, la macro-faune opère une **sélection** qui rajeunit et stimule l'activité microbienne.

D.2 Les micro-organismes végétaux du sol et leurs fonctions

D.2.1 Micro-organismes aérobies ou anaérobies, autotrophes ou hétérotrophes

Il existe plusieurs tonnes de micro-organismes par hectare dans le sol.
Tableau : **Caractéristiques des principaux groupes de la microflore** *(selon RIVIERE)*

Nature	Localisation dans le sol	Poids kg/ha	Principales activités
Algues	Couches superficielles	variable	Fixation de l'azote
Champignons	Couches superficielles	1 000 à 1 500	Amélioration de la structure Décomposition des matières organiques Formation de l'humus
Actinomycètes	Couches superficielles et moyennes	700	Décomposition graduelle de l'humus
Bactéries	Couches superficielles et moyennes	500 à 1 000	Toutes activités

Source : Le sol. Amélioration de l'état nutritif. VILAIN

Selon les conditions du milieu, divers types de bactéries vont se développer :

- les **bactéries aérobies** nécessitent de l'oxygène pour se développer ;
- les **bactéries anaérobies** se développent en milieu privé d'oxygène ;
- les **bactéries hétérotrophes** ont besoin de matière organique comme source d'énergie et de matériaux de construction. Elles participent à la minéralisation et à l'humification de la matière organique ;
- les **bactéries autotrophes** tirent leur énergie et leurs matériaux de construction d'éléments minéraux. Elles participent aux divers processus de passage de l'azote d'une forme minérale à une autre.

D.2.2 Deux types de microflores : microflore de destruction et d'assimilation

L'**activité microbienne** a une influence sur le développement et la nutrition des racines et réciproquement. Dans le sol il existe **deux types de microflores** ayant deux fonctions : une **microflore de destruction/décomposition** puis une **microflore d'absorption et d'assimilation**.

Au niveau de la zone de prolifération microbienne de décomposition, champignons, actinomycètes et bactéries décomposent activement les matières organiques fragmentées par la macro-faune.
Les radicelles sont inactives et leur croissance est inhibée : la microflore de décomposition émet en effet des substances antibiotiques freinant le développement racinaire.

Au niveau de la zone de stockage argilo-humique et de prolifération de la microflore de la rhizosphère (concentration de bactéries associées autour des racines), les racines se développent bien. La microflore d'assimilation constituée de bactéries se développe sous l'impulsion des racines. Elle participe activement à l'assimilation des aliments par la plante au niveau des racines. Elle lui fournit en effet soit des matières azotées élaborées à partir de l'azote gazeux ; soit d'autres substances organiques et minérales issues de la dégradation d'humus ou de l'attaque de minéraux insolubles.

D.2.3 La rhizosphère et l'effet rhizosphère

La **rhizosphère** désigne le **micro-environnement racinaire** où se manifestent des interactions entre racines et micro-organismes.

Dans la rhizosphère :

- les **conditions** sont **favorables au développement des micro-organismes** grâce aux exsudats racinaires (glucides), source de nutriments et d'énergie : il y a prolifération de la microflore d'assimilation ;

- en contrepartie, **les micro-organismes améliorent la disponibilité nutritive et les conditions physico-chimiques** : ils solubilisent des éléments difficilement assimilables par les racines, minéralisent la matière organique, et produisent des substances (vitamines...) dont la plante bénéficie.

D.2.4 Les facteurs de l'activité microbienne

Les **êtres vivants** extrêmement nombreux dans le sol ont plusieurs fonctions très importantes. L'ensemble de ces activités définit l'**activité microbienne**. Plusieurs facteurs agissent sur l'activité microbienne.

Pour se développer et être actifs les micro-organismes ont besoin :

- d'**énergie** : les microbes, hétérotrophes, exigent des composés facilement biodégradables tels que les sucres, l'amidon et la cellulose comme source d'énergie ;

- d'**éléments nutritifs** : éléments minéraux, oligo-éléments ou acides-aminés de la solution ou provenant de la dégradation de la matière organique (concurrence avec les plantes) ;

- d'un **environnement favorable** : température, humidité, aération influent sur l'activité microbienne. En effet certaines conditions doivent être réunies pour favoriser une bonne activité microbienne :

→ <u>l'aération et le pH du sol</u> :
- le sol doit être bien aéré pour offrir l'oxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies,
- l'activité des micro-organismes augmente avec le pH du sol et se stabilise pour un pH=7,3.

→ <u>la température et l'humidité dépendantes du climat</u> :
- la minéralisation augmente avec l'humidité jusqu'à ce que l'humidité atteigne les 2/3 de la capacité de rétention du sol ;
- la température optimale pour l'activité microbienne est 28°C (minimum 0°C, maximum 40°C).

Ces paramètres influent indirectement l'évolution de la matière organique. Ils peuvent être modifiés par des actions culturales telles que l'apport d'amendements humiques, d'amendements calcaires, etc.

D.3 Les fonctions de l'activité biologique

D.3.1 Transformation de la matière organique

D.3.1.1 La décomposition de la matière organique du sol

D.3.1.1.1 Définition de la décomposition de la matière organique fraîche

La **décomposition** est une **désagrégation**, une première simplification des matières organiques fraîches.

Elle est débutée par la macro-faune du sol.

Elle transforme la **matière organique fraîche en produits transitoires.**

D.3.1.1.2 Les deux phases de la décomposition

La macro-faune du sol, dont les vers de terre font partie, assure par le brassage et la division, une première décomposition de la matière organique fraîche. Puis les micro-organismes du sol détruisent les molécules divisées de la matière organique fraîche.

La 1ère étape (matière organique → produits transitoires) se fait en deux phases :

1) une première phase de **croissance microbienne**. Il y a multiplication des agents destructeurs de la matière organique :
- augmentation du nombre de microbes ;
- restitution des résidus de la décomposition : eau, CO_2, chaleur.

Durant cette phase, les microbes utilisent momentanément l'azote minéral du sol et entrent donc en concurrence avec la plante.

2) une seconde phase de **décroissance microbienne** :
- diminution du nombre de microbes ;
- libération de substances nutritives organiques et minérales, provenant de la décomposition de la matière organique et de la mort des corps microbiens.

D.3.1.2 L'humification

D.3.1.2.1 Le processus d'humification

L'**humification** est le processus de transformation des produits transitoires en humus stable. Au lieu de se minéraliser complètement, certaines des molécules des produits transitoires se regroupent, se condensent, se polymérisent pour aboutir à des substances nouvelles à très grosses molécules, **l'humus stable**.

La quantité et la nature de l'humus stable formé dépendent des matières premières (débris végétaux...) et des conditions du milieu (aération, humidité, acidité, température,...).

Les agents biologiques responsables de l'humification sont très nombreux (bactéries, actinomycètes, champignons,...).

L'humification résulte de **processus biologiques** mais est aussi due à des **agents physiques** et à des **réactions chimiques** :

- fixation d'azote, l'humus contient environ 5% de l'azote total du sol ;
- oxydations (fixations d'O_2) si l'aération est suffisante ;
- polymérisations qui amènent à l'humus stable.

D.3.1.2.2 Les différents types d'humus formés selon les conditions de milieu

Les **conditions du milieu** au cours de l'humification ont une influence sur le **type d'humus** formé :

<u>En milieux aérés</u> :

pH>=7 : **mull calcique**
pH≅5.5 : **mull forestier**
4<pH<5 : **moder**
pH<4 : **mor**

<u>En milieux pauvres en oxygène, en sol trop humide</u> :

si l'absence d'O_2 est due à une nappe d'eau temporaire : **anmoor**
si l'absence d'O_2 est due à une nappe d'eau permanente : **tourbe**

D.3.1.3 La minéralisation

D.3.1.3.1 La minéralisation de la matière organique

En même temps que l'humification, se développe par ailleurs la **minéralisation de la matière organique**.

La minéralisation consiste en une dégradation des matières organiques par des simplifications moléculaires successives, conduisant à la **formation de composés minéraux simples**. Ce processus est également réalisé par les micro-organismes hétérotrophes du sol.

Les **minéralisations primaire** et **secondaire** aboutissent à la restitution d'éléments minéraux : azote (NH_4^+, NO_3^-), phosphore (PO_4^{3-}), soufre (SO_4^{2-}), acides (H^+), bases (OH^-), cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+), eau, CO_2.

La majorité des ions nutritifs libérés par la minéralisation dans la solution du sol est adsorbée sur le complexe argilo-humique.

D.3.1.3.2 Minéralisation de la matière organique fraîche et des produits transitoires

Incorporées au sol directement (racines, résidus de récolte) ou après transformation (fumier), les substances organiques évoluent inéluctablement, dans les sols cultivés, vers la **formation de composés minéraux très simples**.

Ainsi le carbone et l'azote organiques donnent respectivement du dioxyde de carbone (CO_2) et l'ion ammonium (NH_4^+). Cette évolution est l'aboutissement des processus dits de **minéralisation**.

La **minéralisation primaire** est l'ensemble des réactions transformant la matière organique fraîche et les produits transitoires en éléments minéraux simples. La matière organique est directement minéralisée, il n'y a pas humification.

D.3.1.3.3 Minéralisation de l'humus : évolution de l'humus en matières minérales

L'**humus** subit également une minéralisation, appelée **minéralisation secondaire ou déshumification**. Il s'agit d'un phénomène très lent : environ 1,5 à 2% de l'humus total est minéralisé par an.

On peut calculer la **quantité d'humus minéralisé (Mh) par an : $Mh = k_2$ * masse d'azote organique**

k_2 : coefficient de minéralisation de l'humus (1,5 à 2% est k_2). Il est estimé ainsi :
$k_2 = 12*(0,2*\theta moy)*Système/(\%CaCO_3*0,3+20)(\%argile+20)$ (formule proposée par Hénin et Dupuis)
Système est un coefficient tenant compte du régime de restitution des résidus de culture.
θmoy est la température moyenne annuelle (en °C)

La culture ne bénéficie de cette minéralisation que durant son temps de présence sur le terrain, on affecte 0,5 à Mh pour les cultures d'hiver et 0,8 pour celles de printemps.
Il est plus souvent intéressant d'opter pour une valeur standard de Mh par situation culturale-type.

Il existe **différentes voies de minéralisation** selon que le milieu est acide ou basique, aéré ou asphyxiant.

D.3.1.3.4 Les facteurs de la minéralisation de la matière organique

La **minéralisation** est réalisée par les micro-organismes lorsque les conditions du milieu sont favorables à une **bonne activité microbienne**.

Les facteurs généraux de l'activité microbienne et ceux spécifiques de la minéralisation sont :

- la **texture** : lorsque le taux d'argile est trop élevé, les molécules organiques y sont fixées et se minéralisent donc plus difficilement ;

- l'**oxygène** : la minéralisation est beaucoup plus lente en anaérobiose (la microflore et le métabolisme microbien sont modifiés) ;

- la **température** et l'**humidité** : la minéralisation est maximale au printemps en régions tempérées ;

- l'**alternance dessiccation-humectation** favorise les processus de minéralisation ;

- le **pH** : la minéralisation est plus lente en milieu acide que dans les sols neutres (l'activité de nombreux microbes est réduite à des pH faibles) ;

- la **nature des substances organiques** : les composés organiques végétaux (sauf lignine) et microbiens se minéralisent assez rapidement contrairement à la lignine et aux substances humiques très stables ;

- la **présence de matière organique fraîche** récemment incorporée stimule la minéralisation ;

- le **rapport C/N** caractérise la biodégradabilité d'une substance : les besoins des micro-organismes correspondent à un C/N compris entre 15 et 30. Si C/N>30, il y a humification, si C/N<15, il a minéralisation. Le rapport C/N est mesuré lors de l'analyse physique du sol.

D.3.2 Les associations nutritives avec la plante

D.3.2.1 Solubilisation directe ou indirecte de nombreux composés minéraux

Les **micro-organismes** améliorent la disponibilité nutritive du sol et les conditions physico-chimiques.

En ingérant des composés insolubles, éléments difficilement assimilables par les racines, ils les solubilisent.

La **solubilisation** fait passer un composé **de l'état solide à l'état de solution**.

Ce processus met davantage d'**éléments minéraux à la disposition de la plante**.

D.3.2.2 Nitrification, dénitrification

La **nitrification** est la **transformation de l'ammonium en nitrates** $NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ par des bactéries nitrifiantes.
Elle a lieu en conditions de bonne aération, en présence de CO_2, de composés carbonatés et de NH_4^+.

La **dénitrification** est la **transformation des nitrates en diazote gazeux** $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ par des espèces microbiennes dénitrifiantes.
Elle a lieu en milieu pauvre en oxygène, saturé en eau.
La dénitrification engendre une perte d'azote fâcheuse sur le plan de la nutrition azotée des plantes.

D.3.2.3 Fixation biologique de l'azote gazeux

Des micro-organismes, **azotobacter** ou **rhizobium**, vivent en symbiose avec certaines plantes, principalement les légumineuses, formant des nodosités au niveau des racines.

Ces bactéries utilisent directement l'azote gazeux comme source d'azote. L'azote gazeux passe alors sous forme organique : c'est la **fixation biologique** de l'azote gazeux.

Ces plantes sont utilisées comme **engrais verts**. Elles sont mises en place entre deux cultures. En effet, la légumineuse enfouie jeune libère rapidement dans le sol l'azote organique qu'elle a fixé. Cette libération se fait au profit de la culture suivante.

E LA FERTILITE DU SOL ET SON AMELIORATION

E.1 Le sol et la plante cultivée

E.1.1 Fonctionnement global de la plante cultivée

E.1.1.1 La plante : un être autotrophe

La plante, être **autotrophe**, tire son énergie du rayonnement lumineux, et ses matériaux de construction des matières minérales de l'air (CO_2) et du sol (eau et sels minéraux).

Elle produit sa matière végétale - correspondant à la production de matière organique - à partir d'énergie lumineuse et de sels minéraux puisés dans le sol.

E.1.1.2 Le fonctionnement des peuplements végétaux

E.1.1.2.1 La photosynthèse

Une des grandes fonctions de la plante est la **photosynthèse**.

Ce processus assure la fourniture de substrats carbonés nécessaires à la croissance de la plante.

La photosynthèse se déroule dans les **chloroplastes des feuilles** : il s'agit de la **production d'assimilat** (sucres sous forme de glucides) à partir d'eau et de dioxyde de carbone CO_2 provenant de l'air. L'énergie lumineuse étant la source d'énergie. Un sous produit de la photosynthèse est le dioxygène O_2.

E.1.1.2.2 Le métabolisme

Le **métabolisme** de la plante conduit à la **formation de matière organique** (protéines, lipides et glucides) à partir du glucose, des éléments minéraux prélevés dans le sol et de l'énergie issue de la photosynthèse.

E.1.1.2.3 La respiration

La **respiration** des plantes traduit la transformation des sucres et de l'oxygène en dioxyde de carbone CO_2 et en eau, libérant de l'énergie utile au métabolisme.

Les feuilles et les racines de la plante respirent. Aussi le sol doit-il être suffisamment aéré pour offrir l'oxygène nécessaire à la respiration racinaire.

E.1.1.3 La germination des semences et la levée des plantules

Pour la plupart des cultures semées, la phase de **germination-levée** constitue une étape essentielle dans l'élaboration du rendement.

La **germination** commence à partir du moment où la semence s'imbibe d'eau et se termine lors de la percée des téguments par la radicule. Une fois la germination terminée, débute la période de croissance souterraine de la plantule qui aboutit à la **levée**.

Semences et plantules sont particulièrement sensibles aux conditions de milieu et notamment aux conditions physiques (température, eau, oxygène, conditions physiques) régnant au sein du **lit de semences** :

- pour que la germination ait lieu, il faut que la semence s'imbibe et absorbe de l'oxygène ;
- pendant la levée, la plantule est particulièrement sensible à des conditions défavorables : dessèchement du lit de semences, conditions anoxiques et rencontre d'obstacles offrant une résistance mécanique à la poussée d'une plantule.

Les **conditions climatiques** survenant après le semis ainsi que l'**état structural du lit de semences** jouent donc un rôle important.

E.1.1.4 La croissance et le développement des organes aériens et souterrains

E.1.1.4.1 Circulation des produits de la photosynthèse dans la plante

Les substances glucidiques synthétisées par la photosynthèse dans les feuilles sont transférées vers les racines, les fruits et les bourgeons, grâce à des vaisseaux conducteurs.

Elles permettent **la croissance et le développement des organes aériens** - feuilles, tiges, fruits - **et souterrains**, les racines, de la plante.

E.1.1.4.2 Croissance et développement de la plante

Les glucides résultant de la photosynthèse sont utilisés pour la croissance et le développement de la plante.

Les substances organiques synthétisées au niveau des feuilles servent d'aliments à tous les organes de la plante : racines, tiges, bourgeons, fleurs, etc.
Une partie des substances synthétisées peut être stockée dans les organes de réserve.

E.1.2 Le sol : support physique de la plante

E.1.2.1 La plante fixée au sol grâce à l'ancrage du système racinaire

Grâce à ses **racines**, la plante est fixée au sol. L'**ancrage** est d'autant plus solide que l'enracinement est profond.

Les racines cheminent dans les pores de diamètre supérieur ou égal aux leurs, et les particules du sol constituent un appui pour les racines.

La longueur des racines et la profondeur d'enracinement dépendent de la **résistance du sol à la pénétration racinaire**. Elle dépend :

- de la granulométrie : la résistance augmente avec la teneur en argile ;
- de l'humidité : la résistance diminue avec l'humidité ;
- de la porosité : plus la porosité est faible, plus la résistance à la pénétration racinaire est élevée.

E.1.2.2 En tant que support, le sol doit être meuble, stable et le plus profond possible

Une **structure fragmentaire** présentant des espaces ou fissures entre les éléments structuraux permet une bonne colonisation des racines et radicelles, contrairement à une **structure compacte** constituant un obstacle à la croissance radiculaire. Ainsi une **semelle de labour** peut faire obstacle à la pénétration racinaire notamment en conditions sèches.

En contrepartie, par leur croissance et leur rôle de prospection du sol, les racines contribuent à augmenter la porosité du sol. Elles fragmentent les sols massifs en s'introduisant dans les fissures et les agrandissent.

De plus, dans le cas d'un peuplement pérenne à enracinement profond (prairie), les sécrétions racinaires jouent un rôle dans la cohésion des éléments structuraux.

E.1.3 La nutrition minérale de la plante et l'évaluation des besoins

E.1.3.1 Les trois principaux éléments des plantes : carbone, oxygène, hydrogène

Les trois éléments caractéristiques des substances organiques des plantes sont le **carbone (C 45%), l'oxygène (O 45%), et l'hydrogène (H 6%),** qui représentent plus de 90% du poids de matière sèche.

Le dioxyde de carbone CO_2 de l'air prélevé par les feuilles et l'eau H_2O prélevée dans le sol sont les sources de ces trois éléments.

E.1.3.2 Les autres éléments minéraux

E.1.3.2.1 Les macro-éléments : azote, potassium, calcium, magnésium, soufre, phosphore, sodium

E.1.3.2.1.1 Importance et rôle de l'azote dans la plante

Les plantes contiennent **1 à 3% d'azote**.

L'**azote** est le constituant principal des **protéines**, il s'unit aux acides dérivés des glucides pour donner des acides-aminés, unités des protéines. Il favorise la multiplication cellulaire, la multiplication des chloroplastes, la constitution de réserves azotées dans les graines. L'azote est **absorbé par les racines** de la plante **sous forme nitrique NO_3^- ou ammoniacale NH_4^+.**

Une **déficience** modérée en azote réduit la croissance, une déficience plus importante entraîne le jaunissement des feuilles les plus âgées, suivi d'une sénescence et d'une baisse de rendement. Les **carences en azote** peuvent être corrigées par l'apport d'**engrais azotés**.

Carence en azote sur blé

Source : ITCF

En revanche, un **excès d'azote** entraîne un retard de maturité, une sensibilité aux maladies et au gel.

E.1.3.2.1.2 Importance et rôle du potassium dans la plante

La matière sèche végétale contient **2 à 4 % de potassium**.

Le **potassium** est un cation libre dans les sucs cellulaires de la plante. Il sert de régulateur dans la fonction de croissance.

Il est **absorbé par les racines** de la plante **sous forme d'ions K^+.**

La **carence en potassium**, assez rare, se manifeste par une croissance réduite et un jaunissement des limbes.
La carence en potassium peut être corrigée par l'apport d'**engrais potassiques**.

Carence en potassium sur blé

Source : ITCF

E.1.3.2.1.3 Importance et rôle du calcium dans la plante

La matière sèche végétale contient **2% de calcium**.

Le **calcium** est un constituant des parois cellulaires et un sel dissous dans la plante. Il assure le développement normal du système racinaire.

Le calcium est **absorbé par les racines** de la plante **sous forme d'ions Ca^{2+}.**

Les **carences en calcium** sont rares. L'apport de calcium dans le sol se fait sous forme d'amendements calcaires.

E.1.3.2.1.4 Importance et rôle du magnésium dans la plante

La matière sèche végétale contient de **0,1 à 0,7% de magnésium**.

Le **magnésium** est un des constituants de la chlorophylle et associé du phosphore.

Le magnésium est **absorbé par les racines** de la plante **sous forme d'ions Mg^{2+}.**

La **carence en magnésium** la plus courante est celle induite par un excès de K^+, Ca^{2+}, NH_4^+ ou si l'acidité est trop élevée. Elle se manifeste par une chlorose sur les feuilles âgées, avec décoloration de la partie médiane.

La **carence en magnésium** peut être corrigée par l'apport d'**amendements magnésiens**.

Carence en magnésium sur maïs

Source : ITCF

E.1.3.2.1.5 Importance et rôle du soufre dans la plante

La matière sèche végétale contient **0,1 à 0,6% de soufre**.

Le **soufre** est un constituant des acides aminés soufrés, des vitamines, et est catalyseur de réactions chimiques.
Le soufre est **absorbé par les racines** de la plante **sous forme d'ions SO_4^{2-}.**

Les **carences en soufre** sont rares. Dans des conditions extrêmes de pauvreté en matière organique, elles provoquent un rabougrissement et un jaunissement de toutes les parties de la plante.
Elles peuvent être corrigées par des **fumures sulfatées**.

Carence en soufre sur blé

Source : ITCF

E.1.3.2.1.6 Importance et rôle du phosphore dans la plante

La matière sèche végétale contient **0,1 à 0,5% de phosphore**.

Le **phosphore** est un des constituants cellulaires et transporteur d'énergie. Il intervient dans la croissance générale de la plante, notamment dans la croissance et le développement du système racinaire. Il favorise la mise à fleur, à fruit et à graine.

La **carence en phosphore** se manifeste par la petitesse des feuilles et des organes végétatifs. La tige est mince et le système racinaire peu développé. Sur le blé, les feuilles rougissent et le tallage est réduit.

Les carences en phosphore peuvent être corrigées par l'apport d'**engrais phosphatés**.

Carence en phosphore sur maïs

Source : ITCF

E.1.3.2.1.7 Importance et rôle du sodium dans la plante

La matière sèche végétale contient **0,001 à 3,5% de sodium**.

Il favorise la croissance générale de la plante. La plupart des espèces végétales peuvent se passer du sodium, tout en le tolérant assez bien. Mais il est nécessaire pour la betterave. Il est **absorbé par les racines** de la plante **sous forme d'ions Na^+.**

E.1.3.2.2 Les micro-éléments ou oligo-éléments dans la plante : fer, manganèse, zinc, cuivre, bore, molybdène

E.1.3.2.2.1 Particularités communes aux oligo-éléments

Les **oligo-éléments** ou **micro-éléments** sont des éléments **indispensables** à la plante.

Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- les oligo-éléments sont **nécessaires en très faibles quantités** (quelques grammes pour une culture). Ils sont absorbés par les racines de la plante sous forme d'ions libres dans la solution, ou sous forme chélatée ;

- les oligo-éléments ont un **rôle métabolique** au sein de la plante, intervenant comme coenzymes ;

- l'action des oligo-éléments sur la culture est très efficace.

E.1.3.2.2.2 Teneurs des sols et des végétaux en oligo-éléments

Les **besoins en oligo-éléments** des plantes sont très inférieurs aux quantités présentes dans le sol, comme le montrent les teneurs comparées des sols et des végétaux en oligo-éléments (mg/kg de matière sèche ou ppm) :

	Sols		Végétaux	Besoins en g/ha/an
	Elément total	Elément échangeable	Teneurs courantes	
Fer	10 000 - 50 000		50 - 100	1 000 - 2 000
Manganèse	200 - 1 000	1 - 2	50 - 150	150 - 700
Zinc	10 - 100	0.2 - 0.5	25 - 50	100 - 300
Cuivre	8 - 40	0.2 - 0.5	5 - 15	25 - 100
Bore	5 - 80	0.1 - 0.5	5 - 40	80 - 200
Molybdène	1 - 10	0.1 - 0.2	0.2 - 1	5 - 20

Source : Techniques agricoles, Coppenet, INRA Quimper

E.1.3.2.2.3 Les carences en oligo-éléments

La **carence** est **l'absence** ou **l'insuffisance d'un élément indispensable au fonctionnement de la plante.**

Les plantes sont plus ou moins sensibles aux carences en oligo-éléments, il existe deux types de carence :

- les **carences induites** : l'élément est présent dans le sol mais non assimilable par la plante ;
- les **carences absolues** : l'élément est réellement absent dans le sol.

Les carences entraînent une **baisse de rendement**.

Pour rectifier l'état carencé, les doses d'oligo-éléments à apporter sont beaucoup plus importantes que les besoins réels de la plante. Par exemple, il faut enfouir 1000 fois les besoins en manganèse, 100 fois ceux en cuivre et en molybdène et 30 à 40 fois ceux en zinc et bore. En effet, des doses importantes sont nécessaires pour maintenir l'oligo-élément sous sa forme assimilable par la plante.

Les carences en oligo-éléments peuvent être corrigées par l'**apport d'engrais au sol** ou par **pulvérisation foliaire**.

E.1.3.2.2.4 Importance et rôle du fer Fe dans la plante

Les **besoins de la plante en fer** sont assez importants : **1 à 2 kg/ha/an**.

Il est **absorbé par les racines** sous forme **Fe^{2+}.**

La **carence en fer** est fréquente, provoquée par un pH élevé, ou des doses élevées de calcium. Elle se caractérise par une **chlorose**. Elle peut être corrigée par l'apport d'engrais.

Carence en fer sur pêcher

Source : SCPA

E.1.3.2.2.5 Importance et rôle du manganèse Mn dans la plante

Les **besoins en manganèse** sont de **150 à 700 g/ha/an** .

La **carence en manganèse** sensibilise les plantes aux infections bactériennes, des taches noires apparaissent sur les feuilles. Elle est provoquée par un pH élevé. Elle peut être corrigée par l'apport d'engrais.

Carence en manganèse sur...

...pommier

Source : SCPA

...vigne

Source : SCPA

E.1.3.2.2.6 Importance et rôle du zinc Zn dans la plante

Les **besoins en zinc** sont de **100 à 300 g/ha/an**.

La **carence en zinc**, carence fréquente chez les arbres, provoque des perturbations dans la croissance. Elle est provoquée par un pH élevé. Elle peut être corrigée par l'apport d'engrais.

Carence en zinc sur maïs

Source : SCPA

E.1.3.2.2.7 Importance et rôle du cuivre Cu dans la plante

Les **besoins en cuivre** sont de **25 à 100 g/ha/an.**

Il n'y a pas de symptômes typiques de la carence cuivrique, aussi est-elle difficile à dépister. Elle est provoquée par un pH élevé. Elle peut être corrigée par l'apport d'engrais.

Carence en cuivre sur blé

Source : SCPA

E.1.3.2.2.8 Importance et rôle du bore B dans la plante

Les **besoins en bore** sont de **80 à 200 g/ha/an**.

La **carence en bore** se manifeste par des troubles de croissance et la résistance à certaines infections est diminuée. Elle est provoquée par un pH élevé. Elle peut être corrigée par l'apport d'engrais.

Carence en bore sur ...

...tournesol

Source : SCPA

...vigne

Source : SCPA

E.1.3.2.2.9 Importance et rôle du molybdène Mo dans la plante

Les **besoins en molybdène** sont de **5 à 20 g/ha/an**.

La **carence en molybdène** se manifeste soit par des symptômes de carences en azote, soit par les signes caractéristiques de la déficience en molybdène, difficile à identifier chez les graminées. Elle est provoquée par un pH faible.

Elle peut être corrigée par l'apport d'engrais.

E.1.4 Biodisponibilité des éléments et absorption racinaire

E.1.4.1 Le potentiel alimentaire du sol

E.1.4.1.1 Les plantes prélèvent les éléments minéraux à l'état d'ions dissous

Les éléments nutritifs se trouvent sous différents états dans le sol. Seules les **formes échangeable**, **chélatée** et **libre** dans la solution sont **disponibles** pour la plante.

Les racines sont en étroit contact avec le sol et sa solution. L'**absorption racinaire** se fait au niveau des **poils absorbants** situés à l'extrémité racinaire : ainsi la zone pilifère, appelée zone d'absorption racinaire, se déplace à mesure que croît la racine.

Ce déplacement de la zone d'absorption permet à la plante de **prospecter un important volume de sol**. La croissance permet de plus d'augmenter la surface d'absorption.

Le **processus d'absorption racinaire** des éléments dissous dans la solution du sol se fait en deux phases :

- une **phase passive** suivant le degré de concentration : les éléments minéraux migrent de la solution du sol à forte concentration vers les poils absorbants à faible concentration ;
- une **phase active** : au sein de la racine, les éléments minéraux migrent grâce à une dépense d'énergie, des poils absorbants vers les vaisseaux conducteurs au centre de la racine.

E.1.4.1.2 La disponibilité des ions dans le sol dépend de deux facteurs

La **disponibilité d'un ion** dans le sol pour la plante dépend de deux facteurs :

- la concentration de l'ion dans le sol ;
- son aptitude à passer à l'état dissous.

La **biodisponibilité** d'un élément est son aptitude à rejoindre la solution du sol en un temps compatible avec la vitesse d'absorption racinaire.

Le sol doit présenter **une offre potentielle ou un potentiel alimentaire** suffisant (aptitude à réalimenter sa phase liquide en éléments nutritifs) pour répondre aux besoins de la plante.

E.1.4.2 L'absorption des éléments minéraux par les racines

E.1.4.2.1 L'absorption des éléments nécessaires à la plante

E.1.4.2.1.1 L'absorption d'eau par les racines

L'**eau** dans la plante constitue un **élément indispensable** à la vie du végétal : elle sert de **véhicule aux substances minérales** (l'ensemble formant la sève brute) des racines vers les feuilles ; elle est aussi **source d'O_2 et de H_2.**

L'eau du sol est **absorbée par les poils absorbants des racines**. Ce phénomène d'absorption de l'eau est à la fois passif et actif :

- **passif**, il est dû à la demande en eau de la plante provoquée par l'**évapotranspiration**, transpiration des feuilles de la plante et évaporation du sol ;
- **actif**, il s'agit de la **succion racinaire** qui entraîne une dépense d'énergie avec respiration racinaire et combustion de glucides.

Les racines absorbent l'eau utilisable par la plante, eau retenue par le sol soit dans de fins canaux soit sous forme de films épais autour des éléments solides. En effet, les racines ne peuvent extraire l'eau formant autour des éléments solides des films très minces. La force de succion racinaire est inférieure à la force de rétention de l'eau par les colloïdes.

Plus le sol est humide, moins la succion des colloïdes est élevée et donc **moins l'eau est retenue par le sol**. En revanche, **plus le sol est desséché**, plus la force de succion est élevée, **moins l'eau est disponible pour la plante**.

E.1.4.2.1.2 L'absorption d'oxygène utile à la respiration racinaire

Les racines absorbent l'**oxygène nécessaire à leur respiration** qui conditionne l'absorption des éléments minéraux.

Le sol doit être suffisamment aéré pour offrir l'oxygène nécessaire à la respiration des racines.

E.1.4.2.1.3 L'absorption des éléments minéraux solubles

Les racines absorbent les matières minérales solubles et dissociées en ions dans la solution du sol.

Certains éléments nutritifs sont rendus solubles par l'action combinée des sécrétions racinaires et des micro-organismes, du CO_2 dégagé par les fermentations, de l'acidité du sol et des acides humiques. Les éléments absorbés sont des **macro-éléments** (carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, potassium, calcium, magnésium), et des **micro-éléments ou oligo-éléments** (fer, zinc, bore, manganèse, cuivre, molybdène).

E.1.4.2.2 Les mécanismes de l'absorption racinaire

E.1.4.2.2.1 Absorption des éléments minéraux au niveau de la zone pilifère

Les racines ancrées dans le sol sont en étroit contact avec le sol et sa solution.

L'**absorption racinaire** se fait au niveau des poils absorbants situés à l'extrémité racinaire : la zone pilifère, appelée zone d'absorption racinaire, se déplace à mesure que croît la racine.

Le **processus d'absorption racinaire** des éléments dissous dans la solution du sol se fait en deux phases :

- une **phase passive** suivant le degré de concentration : les éléments minéraux migrent de la solution du sol à forte concentration vers les poils absorbants à faible concentration ;
- une **phase active** : au sein de la racine, les éléments minéraux migrent grâce à une dépense d'énergie, des poils absorbants vers les vaisseaux conducteurs au centre de la racine.

E.1.4.2.2.2 Déplacement des éléments dissous de la solution du sol vers les racines

L'**absorption racinaire** des éléments minéraux se fait grâce à deux types de **mouvements des éléments minéraux de la solution vers les racines** :

- le phénomène de convection ou mass/flow . L'élément minéral est entraîné par le flux d'eau absorbée par les racines. Cette succion racinaire dépend de la **demande en eau ou transpiration de la plante** au niveau des feuilles ;

- le phénomène de diffusion. L'absorption d'un élément par les racines crée une **différence de concentration** qui est à l'origine du transfert de cet élément par diffusion à partir d'un point de concentration élevée vers un point de concentration plus faible (les racines).

E.1.4.2.2.3 Mobilisation des éléments minéraux dans la rhizosphère

Les racines et les microbes de la rhizosphère peuvent par les excrétions acides, d'une part dissoudre les éléments minéraux, et d'autre part favoriser la minéralisation de la matière organique qui fournit des substances nutritives utilisables par la plante.

E.1.4.2.2.4 Le système racinaire développe une surface d'échange sol-racines

Le développement et la croissance des racines permet de déplacer la zone d'absorption.

Au cours de sa croissance, la plante prospecte donc un **important volume de sol**.

La profondeur explorée par les racines peut être très importante : chez le blé d'hiver, elles dépassent en général 2m et peuvent atteindre 4m.

De plus, la ramification des racines et le nombre important de poils absorbants permettent d'augmenter la **surface d'échange sol - racines**, et donc la surface d'absorption est importante.

E.1.4.2.2.5 Le développement des racines dépend de la structure du sol

La densité apparente du sol permet une croissance normale de 1,4 kg par dm^3 mais cesse au-delà de 1,8.

Ainsi, en sol sableux les racines sont plus longues et fines qu'en sol argileux.

Une **structure fragmentaire** présentant des espaces ou fissures entre les éléments structuraux permet une **bonne infiltration des racines et radicelles**.

En revanche, une **structure compacte** constitue un **obstacle à la croissance racinaire** et un **sol creux** n'offre **aucun support** aux racines.

E.1.4.2.2.6 L'absorption sélective des éléments minéraux

Les racines n'absorbent pas indifféremment les ions.

Cette **sélectivité** va à l'encontre de l'absorption de certains ions comme le sodium.

En revanche, elles peuvent accumuler d'autres ions déjà présents en concentration suffisante, comme le potassium.

Les vitesses d'absorption des ions en ordre décroissant sont :

- pour les cations $NH_4^+ > K^+ > Mg^+ > Ca^{2+} > Na^+$
- pour les anions $NO_3^- > Cl^- > H_2PO_4^- > SO_4^{2-}$

E.1.4.2.2.7 Les antagonismes d'absorption

Trois mécanismes expliquent les **antagonismes d'absorption** entre les ions de la solution :

- la **concurrence ionique** : quand la solution du sol est fortement concentrée en un ion, il sera absorbé en priorité aux dépens des autres ions présents dans la solution ;

- l'**appauvrissement du complexe en un ion** : suite à l'apport d'engrais potassiques, les ions K^+ de la solution sont échangés avec les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du complexe argilo-humique. Ces derniers sont ensuite lessivés. Ce phénomène est appelée **action décalcifiante ou antimagnésienne** des engrais potassiques ;

- le **blocage d'éléments dû à une modification du pH** : lorsque l'augmentation du pH est trop importante (suite à un chaulage trop important), certains oligo-éléments ne sont plus assimilables ; il y a « blocage des ions ».

Les **principaux antagonismes** dans l'absorption des cations :

- l'**absorption de luxe du potassium** : lorsque la concentration en potassium est élevée par rapport aux autres minéraux, l'absorption de l'ion K^+ est privilégiée aux dépens de celles des ions Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^+, B ;

- les **fumures phosphatées** peuvent diminuer l'absorption de Cu et de Zn ;

- les **fumures azotées** peuvent diminuer l'absorption de Cu et de B ;

- un **excès de calcium** entraîne le blocage des éléments Fe, Mn, B, Cu et Zn.

Face aux antagonismes, on comprend l'intérêt des engrais et des amendements organiques.

E.1.4.2.3 Concurrence entre plantes cultivées et adventices vis-à-vis de l'absorption

Les **adventices ou mauvaises herbes**, dont beaucoup sont à enracinement profond et à multiplication végétative, envahissent les champs et les prés humides d'autant plus facilement que le désherbage n'est pas correctement effectué.

Tout comme la plante cultivée, les adventices, êtres autotrophes, produisent leur matière organique à partir du rayonnement lumineux, du CO_2 prélevé dans l'air et des éléments minéraux du sol.

Il y a **concurrence entre la culture et les adventices** dans l'utilisation de l'eau et des éléments minéraux du sol, c'est-à-dire **compétition au niveau de l'absorption racinaire**.

Un des objectifs du travail du sol avant le semis est la **destruction des adventices**.

E.1.4.2.4 *Facteurs de l'activité racinaire*

E.1.4.2.4.1 Une bonne aération et une bonne humidité favorisent l'activité racinaire

L'**activité racinaire** est liée à la **présence d'eau**, à un bon **contact sol - racines**, et au **renouvellement de l'atmosphère**.

Lorsqu'il y a excès d'eau, le sol est mal oxygéné et par conséquent l'activité racinaire, nécessitant de l'oxygène pour la respiration des racines, diminue.

Un sol creux, comme un sol trop tassé, est peu favorable au fonctionnement du système racinaire et à une absorption racinaire efficace.

E.1.4.2.4.2 L'absorption racinaire des éléments dépend du pH

Le maintien du **pH** du sol entre certaines limites proches de la neutralité, **pH compris entre 6 et 7**, est nécessaire pour que soient bien assimilés les éléments nutritifs du sol.

*Pour des pH < 6, les éléments P, N, K, Ca, Mg, S, Mo sont difficilement absorbés par les racines et ce d'autant plus que le pH diminue ; les éléments Fe, Mn, Cu, Zn, Al deviennent de plus en plus solubles, il se passe alors un phénomène de toxicité .

La **correction du pH** peut se faire par des amendements calcaires.

*Pour des pH > 7, le phénomène de blocage se passe pour certains éléments suite à un excès de calcium : le phosphore cristallise, la carence en fer se traduit par une chlorose, il y a également carences en Mn et B.

E.1.4.2.4.3 Interaction entre activité racinaire et activité microbienne

L'**activité microbienne** et l'**activité racinaire** ont des influences réciproques.

Au niveau de la **zone de prolifération microbienne de décomposition**, les radicelles sont inactives et leur croissance est inhibée : la microflore de décomposition émet en effet des substances antibiotiques freinant le développement racinaire.

Au niveau de la **rhizosphère,** les racines se développent bien. La microflore associée, stimulée par les excrétions racinaires (glucides) et de moins en moins freinée par la microflore de décomposition, mobilise les substances nutritives organiques et minérales du complexe argilo-humique au profit de la plante.
La microflore associée participe activement à l'assimilation des aliments par la plante au niveau des racines. Elle lui fournit en effet soit des matières azotées élaborées à partir de l'azote gazeux ; soit d'autres substances organiques et minérales issues de la dégradation d'humus ou de l'attaque de minéraux insolubles.

E.2 Méthode d'étude et d'appréciation des sols en agronomie

E.2.1 L'étude sur le terrain : le profil cultural

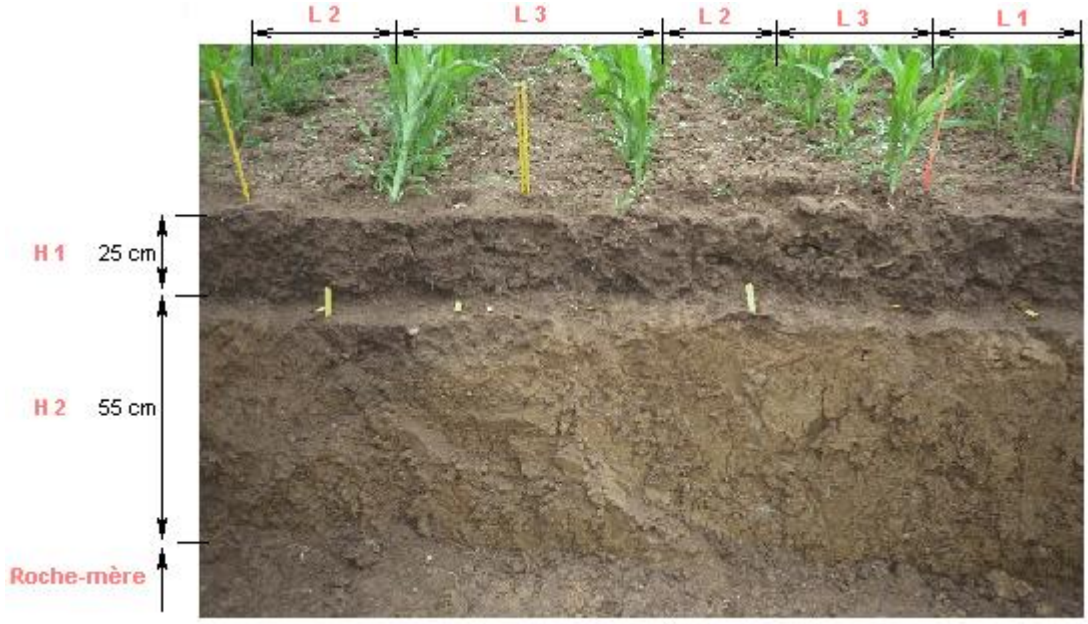
E.2.1.1 Le profil cultural

Le **profil cultural** est un ensemble constitué par la **succession des couches de terre**, individualisées par l'intervention des instruments de culture ; les racines des végétaux et les facteurs naturels réagissant à ces actions. L'observation du profil cultural est utile car c'est :

- un outil d'évaluation des potentialités agronomiques ;
- un outil d'aide à la décision ;
- un outil d'expertise agronomique ;
- un outil d'acquisition de références ;
- un outil de conseil en travail du sol.

La **description du profil cultural** se fait à plusieurs niveaux :

- selon la partition verticale : description des horizons ;
- selon la partition latérale : description des endroits où sont passées les roues d'engins ;
- strate par strate : description de l'état structural, de l'enracinement, de l'état d'oxydation, des symptômes d'hydromorphie, localisation des matières organiques, présence d'animaux vivants...



Cette observation débouche sur des diagnostics et des pronostics ayant trait au peuplement végétal et au système de culture.

E.2.1.2 La partition latérale : observation des endroits des passages des roues d'engins

Au niveau de la **partition latérale** du profil cultural, trois types de niveaux peuvent être observés qui correspondent aux interventions culturales :

L1	emplacements affectés par les roues d'engins, après les derniers travaux d'ameublissement superficiel. Leurs traces sont visibles en surface au moment de l'observation.
L2	endroits où ont circulé les roues d'engins utilisés entre le labour et la dernière façon d'ameublissement.
L3	résidu indemne des actions précédentes.

Source : Guide méthodique du profil cultural, GAUTRONNEAU ET MANICHON

E.2.1.3 La partition verticale : observation des différents horizons

L'examen du profil cultural dans le sens vertical permet de **distinguer** et de **délimiter des couches de sol** (des horizons) qui correspondent à des caractéristiques et à des processus de différenciation variés.

Au sein d'un horizon donné, dans les couches travaillées, c'est surtout la variabilité de l'état structural et ses conséquences sur l'enracinement et l'état d'oxydation de la terre qui est importante.

La **partition verticale** du profil cultural de la surface du sol vers la profondeur :

Ho	Surface du sol
H1 à H4	Horizons de reprise du labour
H5	Horizon labouré non repris
H6 à H7	Bases d'horizons labourés anciens
H8	Sous le fond de labour le plus ancien, horizon partiellement ameubli par des outils profonds du type sous-soleuse

Source : Guide méthodologique du profil cultural, GAUTRONNEAU ET MANICHON

E.2.1.4 Description de l'état structural et autres observations

E.2.1.4.1 Organisation de l'état structural

Il y a **trois niveaux d'organisation structurale** dans les horizons :

1er niveau : **l'état interne des mottes.**
2ème niveau : **le mode d'assemblage des mottes et les cavités.**
3ème niveau : **le regroupement des modes d'assemblage.**

Les **autres observations** du profil cultural concernent principalement :

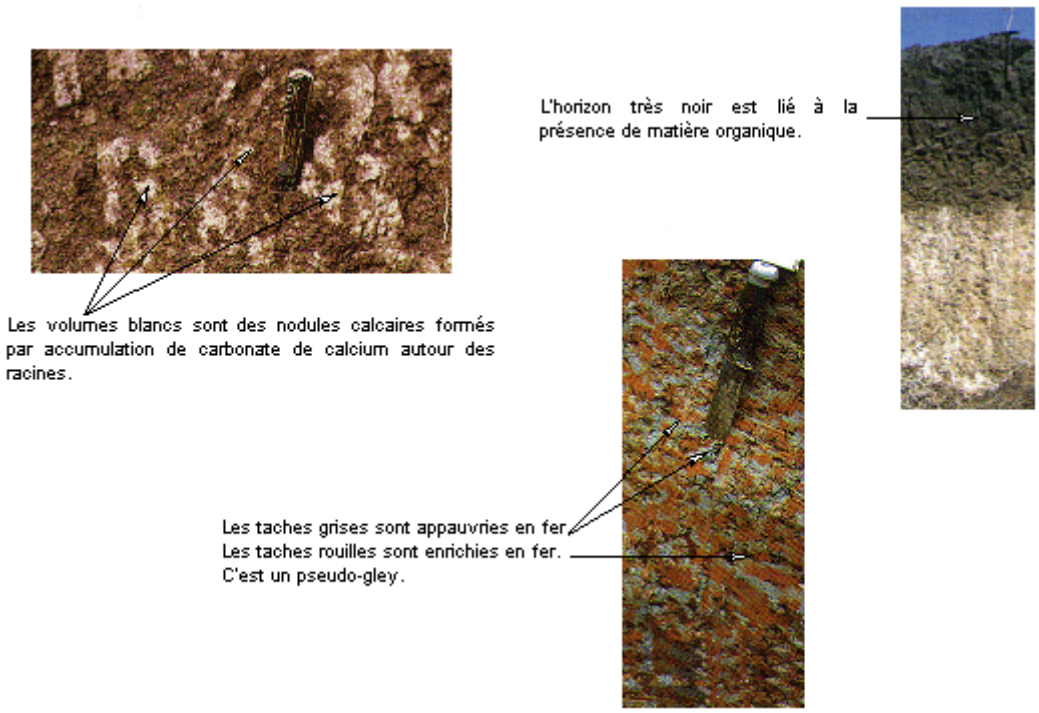
1- les symptômes en surface comme l'intensité de la battance, l'érosion, la fissuration, la taille des mottes, les débris végétaux ;
2- l'humidité de la terre ;
3- la couleur des horizons, les taches de couleur, les concrétions ;
4- la densité des racines selon les strates et leur forme, la profondeur d'enracinement.

E.2.1.4.2 Description et interprétation des couleurs au sein d'un horizon

Les sols présentent des **variations verticales et latérales de couleur**. Ces couleurs révèlent les constituants du sol et ses mécanismes.

Signification des couleurs :

Constituants colorant le sol	Couleur	Conditions hydriques
Matière organique	Sombre (noir, marron, gris foncé, ...)	
Calcaire et sels solubles (chlorures et carbonates)	Blanc	
Fer : - fer ferreux - oxyhydroxyde de fer ou goethite - oxyde de fer ou hématite	 Gris et bleu (taches de gleys) Brun et jaune Rouge (taches de rouille)	 Excès d'eau. Régime hydrique assez peu contrasté. Régime hydrique contrasté, alternance d'une humidité forte mais aérée avec une sécheresse accentuée.



Source : Regards sur le sol. RUELLAN

E.2.1.4.3 Description du système racinaire

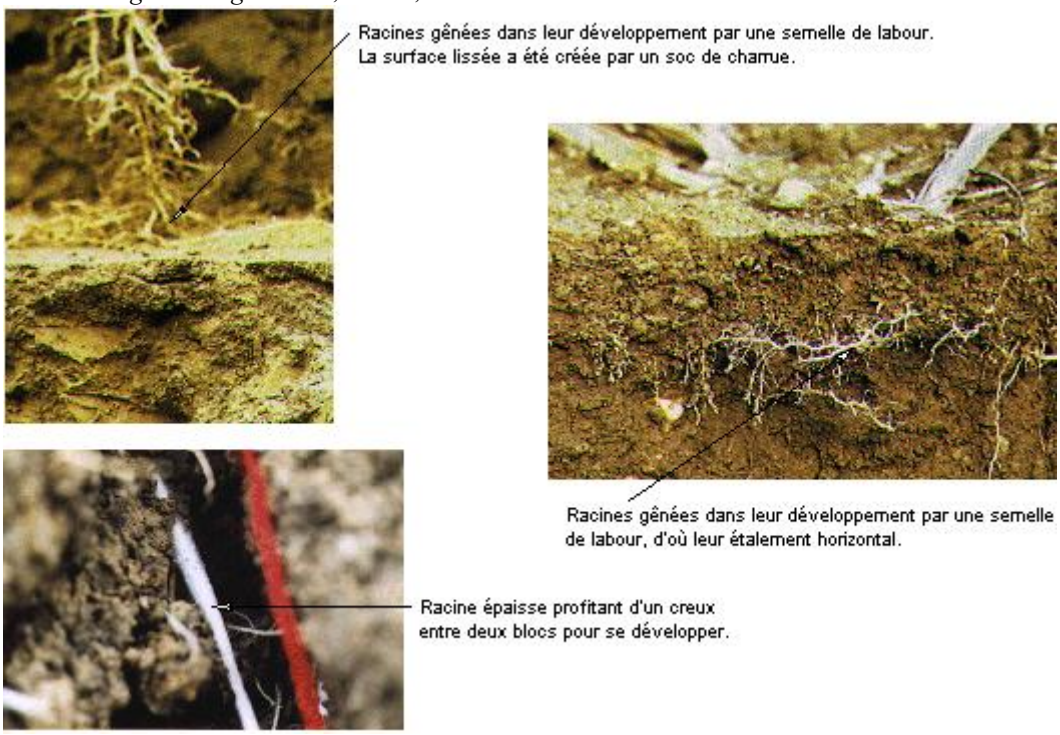
Certains comportements racinaires au sein d'un horizon traduisent des problèmes structuraux du sol.

Quelques comportements radiculaires et causes probables :

Observations	Diagnostics

Pivot fourchu :	mottes, semelle de labour, obstacle
Pivot peu développé, racines coudées :	obstacles liés à la granulométrie
Diamètres réduits par endroit :	racine serrée dans une fissure ou entre deux mottes
Etalement horizontal :	structure lamellaire, tassement
Arrêt brusque, racine remontante :	tassement, toxicité, plan d'eau
Couleur sombre, état malsain, odeur d'alcool :	zone asphyxiée
Racines en pinceau :	blessures (opérations culturales, parasites)
Racines grainées de rouille :	réduction temporaire
Racines très ramifiées, radicelles très grandes :	sol trop creux
Racines développées en arête de poisson :	développement dans une fente de retrait ou entre des éléments grossiers

Source : Eléments d'écologie et d'agronomie, Duthil, Baillère



E.2.1.4.4 Détermination grossière de la texture

Au moment du profil cultural, il est possible d'avoir une première idée de la **texture** en prélevant de la terre des différents horizons.

Il s'agit de faire le **test du boudin de terre humide** :

- si le boudin est impossible à faire : moins de 15% d'argile et probablement plus de 50% de sable ;
- si roulé sur la main, le boudin se fragmente : mois de 18% d'argile ;
- si le boudin ne se fragmente pas mais ne peut être roulé en un anneau : entre 18 et 25% d'argile ;
- si l'anneau peut être formé et ne se brise pas : plus de 25-30% d'argile.

De plus, en frottant la terre dans la paume, la **teneur en sables** est repérée par la sensation d'abrasion.

E.2.2 L'étude en laboratoire : l'analyse de sol

E.2.2.1 L'analyse physique

E.2.2.1.1 Analyse granulométrique et interprétation

L'**analyse granulométrique** est la classification des éléments minéraux selon leur grosseur.

On distingue dans un premier temps les **éléments grossiers** de diamètre supérieur à 2mm, de la **terre fine** de diamètre inférieur à 2mm.

La granulométrie permet de **déterminer la texture du sol**.
Echelle granulométrique :

Terre fine					**Eléments grossiers**	
< 2 µ	2µ - 20µ	20µ - 50µ	50µ - 200µ	200µ - 2mm	2mm - 2cm	>2cm
argiles	limons fins	limons grossiers	sables fins	sables grossiers	graviers	cailloux

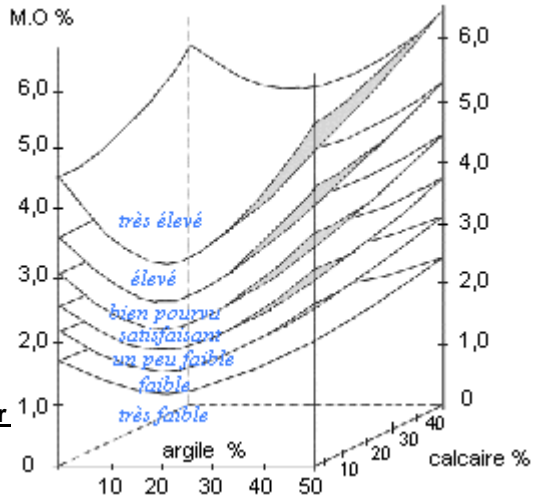
La teneur de ces différents éléments minéraux s'exprime en pourcentage de matière sèche de l'échantillon de terre.

E.2.2.1.2 Teneur en matière organique et interprétation

La **matière organique** joue un rôle essentiel dans la structure du sol et dans la nutrition de la plante.

La **teneur optimale** de matière organique est fonction des teneurs en argile et en calcaire du sol. Elle s'exprime en pourcentage de la matière sèche de l'échantillon de terre.

- pour qu'un sol soit bien pourvu en matière organique, la teneur doit être >2% ;
- plus il y a d'argile, plus il faut de matière organique pour équilibrer le complexe argilo-humique ;
- pour les teneurs faibles en argile (<20%), il faut davantage de matière organique pour compenser le déficit en colloïdes.



Abaque d'interprétation de la teneur en matière organique du sol
(selon Rémy et Marin-Laflèche)

E.2.2.1.3 Dosage du calcaire total et interprétation

La **teneur en carbonates** s'exprime en g/kg de la matière sèche de l'échantillon.

Dénomination des sols en fonction de la teneur en carbonates totaux :

Teneur en $CaCO_3$%	< 0,5	0,5 à 2,0	2,0 à 5,0	> 5,0
Dénomination	normal	suffixe calcaire	préfixe calcaro	calcaire

Lorsque la teneur en calcaire total est élevée (>5,0 g/kg), il est nécessaire de **mesurer son activité**.

E.2.2.1.4 Dosage du calcaire actif et interprétation

L'**activité du calcaire** dépend de sa dureté (un calcaire tendre, la craie, donne beaucoup de calcaire actif, contrairement à un calcaire dur, les dolomies).

Le **calcaire actif** est la fraction de carbonates qui s'altèrent facilement et rapidement.

La **teneur en calcaire actif** s'exprime en pourcentage de la matière sèche de l'échantillon.

E.2.2.1.5 Mesure du pH et interprétation

Le **pH** est lié à la teneur en calcaire, les sols calcaires ont un pH neutre ou basique.

Niveau souhaitable du pHeau selon le type de sol :

TERRES SABLEUSES OU LIMONEUSES		**TERRES ARGILEUSES**			
		de 15 à 25% d'argile		plus de 25% d'argile	
<5,8	faible	<6	faible	<7	faible
6,2 à 6,4	**optimum**	6,2 à 6,5	normal	**7 à 7,4**	**optimum**
6,4 à 6,6	normal	**6,5 à 6,8**	**optimum**	>7,4	élevé
>6,6	élevé	>6,8	élevé		

Source : Méthodes d'étude et d'appréciation des sols cultivés

E.2.2.1.6 Mesure du rapport C/N

La valeur du **rapport C/N** (carbone / azote) renseigne sur l'état biologique du sol, en évaluant l'**évolution de la matière organique**.

En effet, lorsque la matière organique est décomposée, il y a perte de carbone sous forme de CO_2, l'azote se combine à l'humus. Le rapport C/N diminue.

Si le rapport est trop élevé, il doit y avoir un problème de décomposition de la matière organique.

Valeur du C/N	**Evolution de la matière organique (MO)**
C/N < 10	MO bien évoluée
10 < C/N < 30	MO insuffisamment évoluée
C/N > 30	MO non évoluée

Les teneurs en carbone C et en azote N sont exprimées en g/kg.

E.2.2.2 L'analyse chimique

E.2.2.2.1 Dosage des bases échangeables Ca, Mg, P, K et interprétation

E.2.2.2.1.1 Dosage du calcium

La **teneur en CaO** (exprimée en g/kg) mesure la quantité d'**ions calcium dans le sol Ca^{2+}** (exprimée en $cmol^{+}$/kg).

Le teneur souhaitable de CaO en ppm : **CaO= %argile x 100 + %MO x 500**

Equivalence pour l'interprétation des résultats d'analyse :

Expressions connues	**Expressions recherchées**				
	Ca(cmol+/kg)	Ca (%)	Ca (ppm)	CaO (‰)	CaO (ppm)
Ca(cmol+/kg)	-	0,20	200	0,28	280
Ca (%)	4,99	-	1000	1,40	1400
Ca (ppm)	0,005	0,001	-	0,0014	1,40
CaO (‰)	3,57	0,71	710	-	1000
CaO (ppm)	0,0035	0,0007	0,71	0,001	-

E.2.2.2.1.2 Dosage du phosphore

La **teneur en P_2O_5** (exprimée en g/kg) mesure la **quantité d'ions phosphates PO_4^{3-} dans le sol**.

Pour interpréter cette teneur, on tient compte des exigences des cultures et du type de sol.

On considère **deux seuils de référence** : en deçà du premier (**T renforcée**), la fumure est obligatoirement renforcée, au-delà du second (**T impasse**), on peut faire une impasse sauf pour les cultures exigeantes. Entre les deux valeurs, on cherche à assurer l'**entretien des capacités nutritives du sol** en compensant les exportations des cultures.

Valeurs seuils caractéristiques des sols suivant leur texture :

	P_2O_5 Joret-Hébert (g/kg)									
	Argilo-calcaires superficiels		Argilo-calcaires profonds		Limons et argiles profonds		Limons battants		Sols sablo-graveleux	
Classe d'exigence de la culture	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp
Elevée	0,14		0,12		0,08		0,10		0,06	
Moyenne	0,08	0,18	0,08	0,12	0,08	0,13	0,10	0,16	0,06	0,16
Faible		0,15		0,12		0,12		0,15		0,13

Source : COMIFER 1993

Exigences des cultures par rapport au potassium :

P_2O_5	
Exigence élevée	Betterave, colza, luzerne, pois, pomme de terre
Exigence moyenne	Maïs ensilage, blé dur, ray-grass, orge, sorgho
Exigence faible	Avoine, blé tendre, maïs grain, soja, tournesol

Source : COMIFER 1993

E.2.2.2.1.3 Dosage du potassium

La **teneur en K_2O** (exprimée en g/kg) mesure la **quantité d'ions potassium K^+ dans le sol** (exprimée en $cmol^+/kg$).

Pour interpréter cette teneur, on tient compte des exigences des cultures et du type de sol.
On considère **deux seuils de référence** : en deçà du premier (**T renforcée**), la fumure est obligatoirement renforcée, au-delà du second (**T impasse**), on peut faire une impasse sauf pour les cultures exigeantes. Entre les deux valeurs, on cherche à assurer l'**entretien des capacités nutritives du sol** en compensant les exportations des cultures.

Valeurs seuils caractéristiques des sols suivant leur texture :

	Potassium K_2O échangeable (g/kg)									
	Argilo-calcaires superficiels		Argilo-calcaires profonds		Limons et argiles profonds		Limons battants		Sols sablo-graveleux	
Classe d'exigence de la culture	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp
Elevée	0,30		0,25		0,20		0,17			
Moyenne	0,30	0,40	0,20	0,30	0,15	0,22	0,12	0,18	0,07	0,12
Faible		0,30		0,18		0,15		0,15		0,10

Source : COMIFER 1993

Exigences des cultures par rapport au potassium :

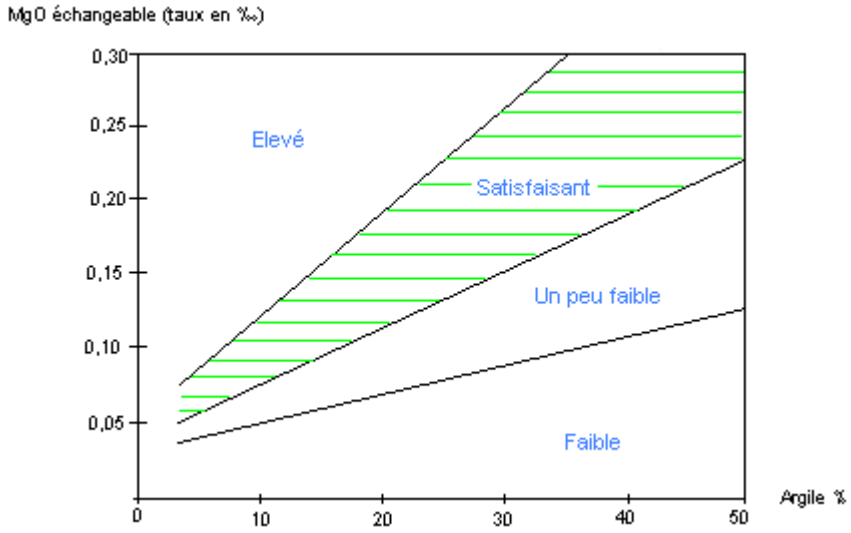
K_2O	
Exigence élevée	Betterave, pomme de terre
Exigence moyenne	Colza, luzerne, maïs ensilage, maïs grain, pois, ray-grass, soja, tournesol
Exigence faible	Avoine, blé dur, sorgho, blé tendre, orge

Source : COMIFER 1993

E.2.2.2.1.4 Dosage du magnésium

La **teneur en MgO** (exprimée en g/kg) mesure la **quantité d'ions magnésium Mg^{2+} dans le sol** (exprimée en $cmol^+/kg$).

Cette teneur est comparée à la **teneur souhaitable** indiquée par l'abaque suivante :



E.2.2.2.1.5 Dosage du sodium

La **teneur en Na_2O** (exprimée en g/kg) mesure la **quantité d'ions sodium Na^+ dans le sol** (exprimée en $cmol^+/kg$).

E.2.2.2.2 Dosage des oligo-éléments et interprétation

Une analyse de sol renseigne sur la **richesse en oligo-éléments** grâce à la mesure des **teneurs en Zn, Mn, Cu, Fe, B, Al, Mo, Co**.

Les teneurs sont comparées aux teneurs souhaitables indiquées par des abaques.

Teneurs comparées des sols et des végétaux en oligo-éléments (mg/kg de matière sèche) :

	Sols		Végétaux (feuilles)		Besoins en g/ha/an
	Elément total	Elément échangeable (assimilable)	Teneurs courantes	Seuil de carence	
Fer	10 000-50 000		50-100	20 (feuilles de poirier, aiguilles de pin)	1000-2000
Cuivre	8-40	0,2-0,5	5-15	5 (céréales en herbe, feuilles d'arbres fruitiers)	25-100
Zinc	10-100	0,2-0,5	25-50	15 (maïs, feuilles d'arbres fruitiers)	100-300
Molybdène	1-10	0,1-0,2	0,2-1	0,1 (feuilles de chou-fleur ou de luzerne)	5-20
Manganèse	200-1000	1-2	50-150	20 (céréales en herbe, feuilles d'arbres fruitiers)	150-700
Bore	5-80	0,1-0,5	5-40	20 (feuilles de betterave ou de luzerne)	80-200

Source : Techniques Agricoles, Volume 1, Durieux, Keilling, Martin

E.2.2.2.3 Mesure de la CEC : Capacité d'Echange Cationique

La mesure de la **capacité d'échange cationique** permet de connaître le **pouvoir fixateur du sol en éléments nutritifs**.

CEC ($cmol^+/kg$)	Pouvoir fixateur du sol
> 30	très élevé
de 20 à 30	élevé
de 10 à 20	moyen
de 5 à 10	faible
< 5	très faible

E.3 Le contrôle de l'humidité

E.3.1 Les excès d'eau et les procédés d'assainissement

E.3.1.1 Les causes de l'excès d'eau et les moyens de lutte

E.3.1.1.1 Les causes du mauvais écoulement de l'eau

Le **mauvais écoulement** de l'eau est la conséquence :

- d'une couche imperméable en profondeur dans un sol perméable ;
- d'une circulation lente car le sol est peu perméable ;
- d'une absence d'infiltration car le sol est imperméable.

L'absence ou la faible infiltration de l'eau est due à une mauvaise conductivité hydraulique de l'eau dans le sol.

La mauvaise infiltration de l'eau dans le sol entraîne soit l'**engorgement du sol**, soit le **ruissellement de l'eau en surface**.

E.3.1.1.2 Le ruissellement de l'eau en surface

Lorsque l'intensité des pluies est telle que le sol ne peut plus absorber l'eau, l'eau peut ruisseler à la surface du champ, le **ruissellement** étant d'autant plus important que la **pente du sol** est **élevée**.

L'eau qui ruisselle entraîne les particules superficielles du sol. L'**érosion superficielle** est d'autant plus forte que la quantité de terre fine est élevée et que la pente de la parcelle est élevée.

Pour **limiter le ruissellement** il s'agit de **favoriser l'infiltration de l'eau**, et ce d'autant plus que le sol est en pente.

Pour cela, il faut :

- travailler le sol suivant les courbes de niveau et non dans le sens de la pente ;
- implanter ou ne pas arracher des haies qui constituent un obstacle au ruissellement, ou mettre en place des bandes enherbées ;
- apporter des matières organiques, amendements humiques, pour accroître la stabilité structurale ;
- briser la croûte de battance par des binages pour favoriser l'infiltration.

E.3.1.2 Conséquences de l'excès d'eau sur les propriétés du sol

E.3.1.2.1 Altération des propriétés physiques du sol

E.3.1.2.1.1 Un excès d'eau entraîne une baisse de la stabilité structurale

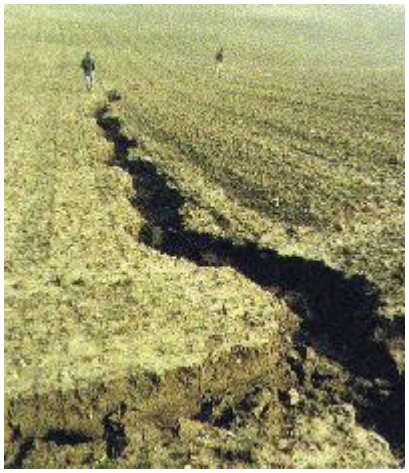
Suite à un **excès d'eau**, la structure du sol rendue moins stable se dégrade :

excès d'eau ⇒ engorgement ⇒ gonflement des colloïdes ⇒ dispersion de l'argile ⇒ disparition des fissures entre les agrégats ⇒ compaction de la structure ⇒ dégradation de la structure.

Le **ruissellement de l'eau en surface** provoque l'**érosion de la parcelle** par entraînement des particules (sables fins ou grossiers) avec l'eau.

Les **sols sableux**, à structure particulaire, sont **sensibles à l'érosion** dès qu'ils sont en pente. Le manque d'argile et surtout d'humus, et l'absence d'une couverture végétale (mulch) pendant l'hiver sont responsables de cette érosion.

Le **ravinement d'une parcelle**, c'est-à-dire la formation de sillons en surface, est également la conséquence d'un ruissellement important.



Source : Tiré à part INRA, Perspectives agricoles, 1991

E.3.1.2.1.2 Un excès d'eau entraîne une diminution de l'aération

Dans un sol **engorgé**, l'eau occupe la totalité de la porosité : les micropores et les macropores.

Elle prend ainsi la place de l'air : le sol est **moins aéré** et devient **asphyxiant**.

Les sols sont également rendus plus froids.

E.3.1.2.2 Conséquences sur les propriétés chimiques du sol

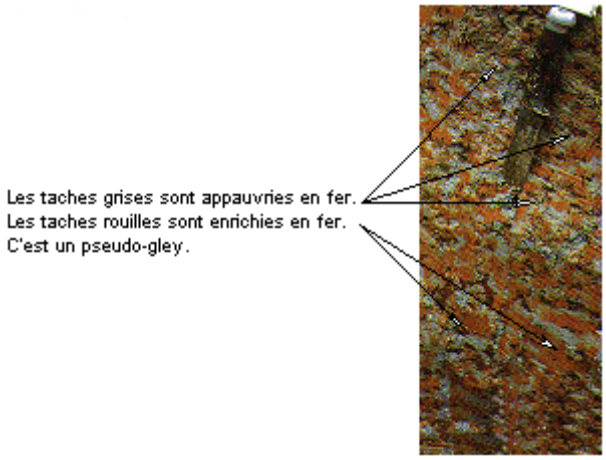
E.3.1.2.2.1 Un excès d'eau provoque acidification et décalcification

Lors d'un **excès d'eau**, les ions calcium sont lessivés et remplacés sur le complexe argilo-humique par des protons H^+ : le départ des ions calcium entraîne la **décalcification** et l'**acidification** du milieu.

E.3.1.2.2.2 Un excès d'eau rend le milieu réducteur

Lorsque le sol est **engorgé**, le milieu devient **réducteur** par l'absence d'oxygène, il y a formation de **taches de gleys**, taches gris-bleu (caractéristiques des milieux asphyxiants) qui résultent de la transformation des oxydes ferriques (Fe_2O_3) en oxydes ferreux (FeO).

Ces taches de gleys peuvent disparaître si le milieu est à nouveau aéré : elles laissent la place à des **taches rouilles** du fer oxydé (Fe_2O_3).



Source : Regards sur le sol. RUELLAN

E.3.1.2.3 Conséquences sur les propriétés biologiques du sol

E.3.1.2.3.1 Un excès d'eau entraîne une diminution de l'activité biologique

Lorsque le sol est **engorgé**, le milieu est rendu difficile (absence d'oxygène) pour les micro-organismes aérobies.

L'activité microbienne est donc ralentie : il s'en suit une diminution de la décomposition et de l'humification de la matière organique et un freinage de la minéralisation.

Il y a prolifération d'une faune et d'une flore anaérobies défavorables aux cultures.

E.3.1.2.3.2 Un excès d'eau perturbe le fonctionnement racinaire

Lorsque le sol est **engorgé**, les racines privées d'oxygène se développent moins et la nutrition racinaire est perturbée.

Finalement s'en suit l'**asphyxie racinaire**.

Le **ralentissement de l'activité microbienne** au niveau de la rhizosphère est également une cause de la mauvaise absorption racinaire.

E.3.1.3 Un moyen de lutte contre l'excès d'eau : le drainage

E.3.1.3.1 La nécessité du drainage

Quand l'humidité du sol demeure supérieure au taux d'humidité à la capacité au champ, c'est-à-dire lorsque l'eau de gravité ne s'écoule plus, ceci traduit un **excès d'eau** : le sol est **engorgé**.

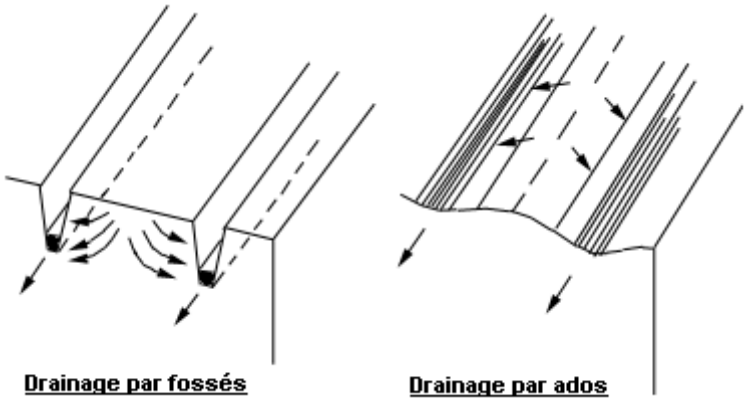
Le **drainage** permet d'assainir le sol.

Il existe plusieurs types de drainage : **drainage superficiel** et **drainage en profondeur**.

E.3.1.3.2 Le drainage superficiel : fossés ou profilage de surface

En **drainage superficiel**, on cherche à intercepter au maximum les eaux de pluie en dirigeant le ruissellement.

L'eau est collectée par infiltration ou ruissellement dans des **fossés drainants ou canaux**.

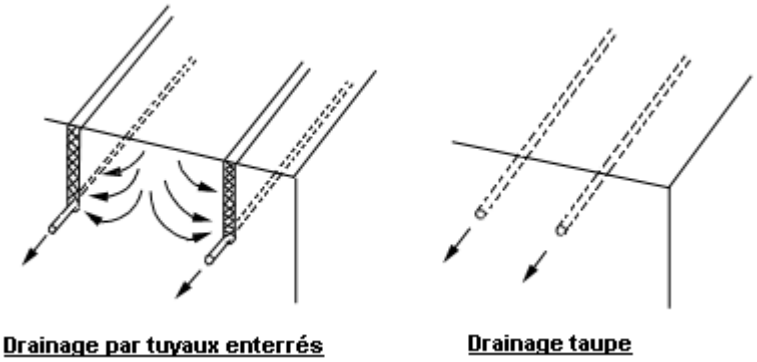


Source : Le Sol. Maîtrise de l'eau. VILAIN

E.3.1.3.3 Le drainage en profondeur

En **drainage souterrain** on aménage un **réseau souterrain de drains** :

- pose de **drains** en poterie ou plastiques ;
- création de **galeries souterraines** : drainage taupe.



Drainage par tuyaux enterrés Drainage taupe

Source : Le Sol. Maîtrise de l'eau. VILAIN

E.3.2 La sécheresse et les procédés d'économie d'eau

E.3.2.1 Les besoins en eau des cultures : calcul du bilan hydrique

E.3.2.1.1 La demande en eau se traduit par l'évapotranspiration

L'**évapotranspiration** correspond à la **perte d'eau par transpiration de la plante et par évaporation du sol** pendant une période donnée.

Sur une période donnée, les pertes d'eau correspondent à **l'évapotranspiration réelle ETR**, elle dépend de la demande atmosphérique, de la surface et disposition des feuilles, de la capacité des plantes à puiser l'eau du sol.

A un stade donné, si les conditions hydriques ne sont pas limitantes, **l'ETR atteint une valeur maximale ou ETM**. La quantité d'eau mesurée ETM correspond donc au besoin optimum en eau pendant la période considérée.

A ce même stade, l'alimentation hydrique n'étant pas limitante, si le développement de la culture ne limitait pas la transpiration, **l'évapotranspiration atteindrait un maximum appelé l'évapotranspiration potentielle ETP**.

L'ETP est indépendante du type de végétation, elle dépend du climat, c'est-à-dire des facteurs température, humidité, radiation et vent.

L'ETP peut être déterminée à l'aide de la formule de Penman :

ETP = aRn + bEa

Rn : rayonnement net
Ea : pouvoir évaporant de l'air et fonction de la vitesse de vent et de l'humidité de l'air
a et b : constantes.

L'ETP entraîne un appel d'eau qui se traduit ultérieurement par une **absorption d'eau par les racines**.

E.3.2.1.2 L'offre en eau : les pluies et la Réserve Utile (RU)

L'**eau présente dans le sol** et disponible pour la plante provient de deux sources :

- fraction des **pluies** pendant la période de végétation, absorbée et retenue par la couche de sol accessible aux racines ;
- fraction d'**humidité accumulée** par le sol en hiver, appelée la **Réserve Utile du sol (RU).**

E.3.2.2 Correction du déficit en eau

E.3.2.2.1 Limiter les pertes d'eau

La remontée de l'eau dans le sol se passe comme si l'eau se trouvait sous forme de films d'épaisseur variable, capables de remonter en bloc grâce à la cohésion des molécules d'eau.

La **remontée de l'eau par diffusion** et la **perte d'eau du sol par évaporation** sont donc favorisées par tout ce qui accroît la cohésion du sol et assure ainsi une continuité et une certaine longueur des films d'eau, c'est-à-dire :
- un sol tassé ;
- beaucoup de racines ;
- une évaporation lente ;
- un arrosage léger.

Elles sont au contraire limitées par tout ce qui rompt la cohésion, et qui assure ainsi une économie de l'eau :
- le sarclage ;
- le binage ;
- une couverture du sol par un mulch (plastiques ou pailles) limitant l'évaporation ;
- l'évaporation brutale responsable de la formation d'une couche superficielle sèche constituant un mulch naturel.

E.3.2.2.2 Irriguer permet de corriger le déficit en eau

L'**irrigation** est un moyen de **combler le déficit en eau** :

La quantité d'eau à apporter au sol est : **Irrigation = ETP - P - kRFU**

ETP : évapotranspiration potentielle
P : précipitations
RFU : réserve facilement utilisable ; elle traduit la disponibilité en eau d'une partie de la réserve hydrique, selon la culture, le type de sol.
k : compris entre 0 et 1, il indique la fraction de la RFU que l'on ne désire pas reconstituer.

La dose d'arrosage devra ramener l'humidité de la couche asséchée par les racines, au maximum à une humidité voisine de la capacité au champ.

Il existe quatre types d'irrigation : **irrigation de surface**, **souterraine**, **par aspersion**, ou **micro-irrigation** ; à adapter selon la pente du terrain, la perméabilité du sol et la culture en place.

E.3.2.3 Les systèmes d'irrigation

E.3.2.3.1 Irrigation de surface

En **irrigation de surface**, l'apport d'eau se fait par ruissellement ou submersion. L'eau s'infiltre dans les sols.

Avec ce système les doses d'eau apportées sont mal maîtrisées.

E.3.2.3.2 Irrigation par infiltration

En **irrigation par infiltration**, l'apport d'eau se fait par des rigoles superficielles. Le principe est celui d'un drainage à l'envers.

Avec ce système les doses d'eau sont mal maîtrisées.

E.3.2.3.3 Irrigation par aspersion

En **irrigation par aspersion**, l'eau est projetée sous forme de pluies.

Ce système permet d'économiser l'eau, de contrôler les doses et d'éviter des aménagements.

E.3.2.3.4 Micro-irrigation

En **micro-irrigation**, l'eau est apportée à la surface de chaque plante par micro-jets.

Ce système est principalement utilisé sur cultures maraîchères.

E.4 Les amendements : substances améliorant l'ensemble des propriétés du sol

E.4.1 Les amendements calcaires et magnésiens et la régulation ionique du sol

E.4.1.1 Rôles du calcium et du magnésium

E.4.1.1.1 Le calcium et le magnésium sont des aliments pour les plantes

Le **calcium** et le **magnésium** apportés par les amendements calcaires et magnésiens constituent une **source d'éléments nutritifs** indispensables à la plante.

E.4.1.1.2 Le calcium et le magnésium sont des amendements pour le sol

E.4.1.1.2.1 Le rôle physique des amendements calcaires et magnésiens

En se fixant sur les colloïdes électronégatifs argileux, les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} augmentent la **floculation des colloïdes** (argile et humus).

La présence d'ions Ca^{2+} permet également la **formation du complexe argilo-humique**, la structure devient grumeleuse, perméable à l'air et à l'eau, et la stabilité structurale est accrue.

E.4.1.1.2.2 Le rôle chimique des amendements calcaires et magnésiens

Le **pH** dans la solution du sol traduit la quantité d'ions H^+ libres dans la solution, en équilibre avec ceux adsorbés sur le complexe argilo-humique.

Si beaucoup de protons sont adsorbés, cela indique qu'il y a peu d'ions calcium dans la solution : **le complexe est désaturé**. Le pH est donc étroitement lié avec le nombre d'ions calcium adsorbés sur le complexe argilo-humique.

Ainsi, un **apport d'ions calcium** modifie le pH du sol en l'augmentant : en prenant la place des ions H^+ sur le complexe argilo-humique, le calcium neutralise l'acidité potentielle du sol et le pH s'élève. L'absorption racinaire est alors améliorée.

Les ions calcium adsorbés sur le complexe argilo-humique peuvent être échangés avec les ions K^+ (après fertilisation) qui sont alors facilement adsorbés.

Les **ions calcium adsorbés sur le complexe argilo-humique** forment un pont calcique, les ions phosphates $H_2PO_4^-$, chargés négativement peuvent ainsi être fixés par le complexe argilo-humique. Ils pourront ainsi être échangés avec la solution et absorbés par les racines.

E.4.1.1.2.3 Le rôle biologique des amendements calcaires et magnésiens

En assurant le maintien du **pH proche de la neutralité** et la **bonne aération du sol** grâce au maintien d'une structure favorable, les amendements calcaires créent un **milieu favorable aux micro-organismes du sol**.

E.4.1.2 Entretien de l'état calcique

L'apport d'amendements calcaires entretient l'**état calcique** du sol.

Il assure en effet un renouvellement de calcaire perdu par décalcification.

E.4.1.3 Les différents amendements calcaires et leur action sur le sol

E.4.1.3.1 Les caractéristiques d'un amendement

Le **produit amendant** doit libérer des ions capables :

- de s'échanger avec les protons H^+ trop nombreux sur le complexe adsorbant ;
- de neutraliser une partie des protons H^+ libres dans la solution ;
- d'assurer la floculation des argiles.

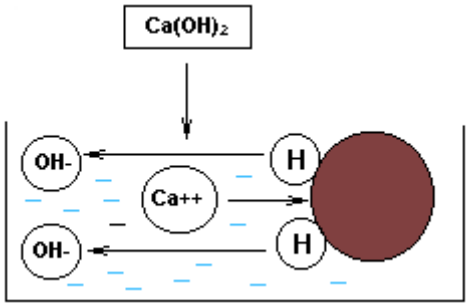
Seuls les cations **Ca^{2+} et Mg^{2+}** sont capables de remplir ces fonctions.

E.4.1.3.2 Les chaux augmentent rapidement le pH

La **chaux vive CaO** ou la **chaux éteinte $Ca(OH)_2$** se décomposent ainsi dans le sol :

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$

les cations Ca^{2+} se fixent sur le complexe argilo-humique en remplacement des protons
les anions OH^- se combinent aux protons de la solution pour former de l'eau
⇒ aucun résidu acide n'apparaît, **l'élévation du pH est rapide**.



Le **chaulage** est l'apport de chaux.

E.4.1.3.3 Les produits d'origine naturelle

Les amendements calcaires peuvent être des produits d'origine naturelle, tels que les **calcaires broyés**, les **craies**, les **marnes**.

Les calcaires ont une action d'autant plus rapide qu'ils sont plus tendres et plus finement broyés.

Action du **carbonate de calcium** présent dans les **calcaires broyés** :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(CO_3H)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2\ CO_3H^-$$

les cations Ca^{2+} se fixent sur le complexe argilo-humique en remplacement des protons,
les anions HCO_3^- se combinent aux protons pour redonner un acide faible.
⇒ la présence du résidu acide fait que **le pH se relève plus lentement qu'avec l'apport de chaux**.

E.4.1.3.4 Les autres sources de calcium

D'autres sources de calcium peuvent servir d'amendements calcaires, tels que les **plâtres**, les **résidus d'industries**, etc.

Action du **sulfate de calcium du plâtre** :

$$CaSO_4 \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-}$$

les cations Ca^{2+} se fixent sur le complexe argilo-humique en remplacement des protons,
les anions SO_4^{2-} se combinent aux protons pour redonner un acide fort.
⇒ La présence du résidu acide fait que cet amendement est **sans action sur le pH**.

E.4.1.4 Les amendements magnésiens et calcaires-magnésiens

Le **magnésium** peut être apporté par **différents amendements** contenant généralement à la fois du calcaire et du magnésium :

Amendement	Teneur en CaO	Teneur en MgO
Chaux magnésienne vive	45 à 75%	**18 à 40%**
Amendement magnésien mixte	30 à 50%	**10 à 30%**
Maërl	40 à 50%	**2.5 à 6%**
Amendement calcaire et magnésien	25 à 45%	**8 à 17%**
Dolomie	20 à 30%	**17 à 21%**

E.4.2 Les amendements humiques

E.4.2.1 Actions des matières organiques sur la fertilité du sol

E.4.2.1.1 Les matières organiques permettent le maintien des propriétés physiques

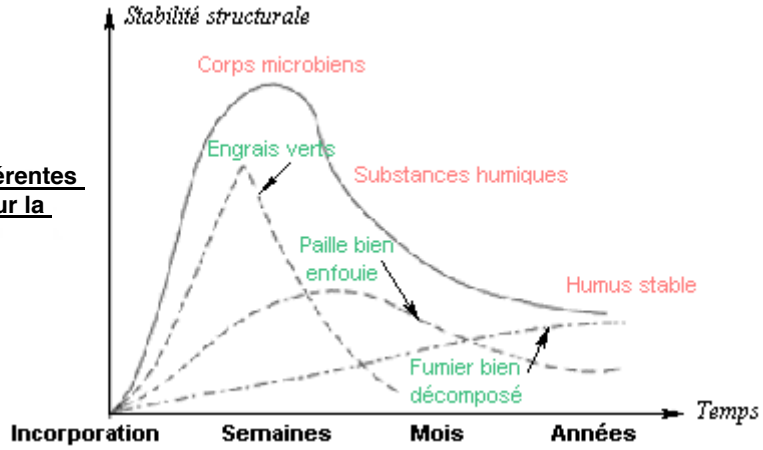
E.4.2.1.1.1 Les matières organiques atténuent l'effet de dégradation de la structure

Par sa fixation à l'argile en un **complexe argilo-humique**, l'humus protège l'argile de sa dispersion dans l'eau et rend ainsi la **structure plus stable**.

La fraction organique intervient ainsi dans les processus de **formation des agrégats** : les substances organiques jouent un rôle dans l'édification de la structure du sol.

Les différents amendements humiques ont une action plus ou moins importante et durable sur la stabilité structurale.

Action comparée des différentes substances organiques sur la stabilité structurale.
(selon Monnier)



E.4.2.1.1.2 Les matières organiques rendent la structure plus perméable

Le rôle des **matières organiques** vis-à-vis de l'eau est important.

A la surface du sol, elles permettent de **limiter l'évaporation** ; enfouies elles favorisent l'**infiltration de l'eau**.

De plus, grâce à leur **pouvoir hydrophile**, les substances humiques retiennent une quantité importante d'eau.

E.4.2.1.2 Les matières organiques améliorent les propriétés physico-chimiques

E.4.2.1.2.1 La décomposition des matières organiques : une source d'aliments

La **matière organique** est une **source d'éléments nutritifs**.

Des éléments minéraux, comme l'azote ou les oligo-éléments sont libérés lors de la **minéralisation de la matière organique**. La libération est progressive, continue et diffuse dans tout le sol. Elle dépend de l'intensité de l'activité microbienne.

L'humus formé constitue par ailleurs une **réserve d'azote** : il contient environ 5% d'azote.

E.4.2.1.2.2 Le complexe argilo-humique formé augmente la CEC

La **matière organique humifiée** ou humus a une **capacité d'échange cationique importante** : 3 à 5 fois supérieure à celle de l'argile.

Dans les sols sableux, pauvres en argile, l'humus constitue la principale source de capacité d'échange.

E.4.2.1.3 La présence de matières organiques stimule l'activité biologique

Les **matières organiques** sont la **source principale de nutriments pour les micro-organismes** généralement hétérotrophes.

Un apport de matières organiques est toujours la cause d'une importante prolifération microbienne.

E.4.2.2 Le bilan humique et le renouvellement de l'humus

E.4.2.2.1 La minéralisation de l'humus

L'humus subit une minéralisation appelée **minéralisation secondaire ou déshumification**.

Il s'agit d'un phénomène très lent : environ 1,5 à 2% de l'humus total est minéralisé par an.

La minéralisation de l'humus aboutit à la **libération d'éléments minéraux nutritifs** utilisables par la plante.

On peut calculer la **quantité d'humus minéralisé (Mh) par an : Mh = k_2 * masse d'azote organique**

k_2 : coefficient de minéralisation de l'humus (1,5 à 2% est k_2). Il est estimé ainsi :
k_2 = 12*(0,2*θmoy)*Système/(%$CaCO_3$*0,3+20)(%Argile+20) (formule proposée par Hénin et Dupuis)
Système est un coefficient tenant compte du régime de restitution des résidus de culture
θmoy est la température moyenne annuelle (en °C).

La culture ne bénéficie de cette minéralisation que durant son temps de présence sur le terrain, on affecte 0,5 à Mh pour les cultures d'hiver et 0,8 pour celles de printemps.

Il existe **différentes voies de minéralisation** selon que le milieu est acide ou basique, aéré ou asphyxiant.

E.4.2.2.2 Le bilan humique

La quantité d'amendements humiques apportée doit permettre de renouveler l'humus minéralisé : il s'agit de faire le **bilan humique** pour savoir quelle quantité de matière organique apporter.

La variation de la quantité d'humus dans un sol sur un intervalle de temps est la **différence entre la quantité d'humus formé par humification à partir des matières organiques fraîches (k_1 : coefficient isohumique) et celle détruite par minéralisation de l'humus ou déshumification (k_2 : coefficient de minéralisation).**

k1 est le coefficient de transformation de la matière organique en humus, il est également appelé **coefficient isohumique**.
k2 est le coefficient de transformation de l'humus en éléments minéraux simples, il est également appelé **coefficient de minéralisation**.

La quantité de matières organiques à apporter au sol est (modèle d'évolution de HENIN et DUPUIS) :

la quantité d'humus présente dans le sol x (k_2/k_1)

E.4.2.3 Les différents amendements humiques

E.4.2.3.1 Les résidus culturaux

- **Les pailles de céréales enfouies** : leur **rapport C/N** est **très élevé**, compris entre 80 et 120. Elles permettent de limiter les pertes hivernales d'azote minéral en excès par lessivage.

Leur **dégradation** est **lente** et nécessite une quantité importante d'azote (on peut envisager un apport d'azote après l'enfouissement des pailles pour éviter un épuisement de l'azote minéral du sol). Elles ont une action sur la stabilité structurale.

Elles donnent peu d'humus : 1 ha de pailles enfouies donne 300 à 350 kg d'humus. Le coefficient isohumique k1 en % de matière sèche enfouie est compris entre 15 et 30%. Avant d'être enfouies, les pailles peuvent être broyées : ainsi leur enfouissement et leur humification sont facilités.

- **Les parties souterraines des plantes** constituent également une source de matière organique, mais il est difficile d'évaluer leur quantité.

- **Les prairies** : sous les prairies s'accumulent des couches de racines qui augmentent la teneur en matières organiques. La stabilité structurale est accrue après le retournement de prairie du fait de l'évolution de la matière organique.

E.4.2.3.2 Les engrais de ferme

E.4.2.3.2.1 Le fumier

La **composition des fumiers** est **très variable** puisqu'elle dépend du type d'élevage, de la durée d'élevage...Le fumier est un mélange en proportions variables de déjections animales solides et liquides et de litières, pailles essentiellement.

Il libère progressivement l'azote.

Le coefficient isohumique k1 du fumier est compris entre 25 et 50% de matière sèche. Une tonne de fumier frais donne 65 kg d'humus s'il s'agit de fumier pailleux (k1=25%) et 100 kg s'il s'agit de fumier bien décomposé (k2=50%).

Le fumier ne doit pas être enfoui directement après la sortie d'étable. Le compostage du fumier, en tas ou à la surface du champ, est nécessaire. Il amorce l'humification, assainit la fumure organique, et prépare son utilisation rapide par les plantes.

E.4.2.3.2.2 Le lisier

La **composition des lisiers** est **très variable** puisqu'elle dépend du type d'élevage, de la durée d'élevage...

Le lisier est un mélange de déjections liquides et solides, assez voisin du purin mais plus riche en composés carbonés stables.

Un apport de lisier, même à dose élevée **n'assure pas l'entretien** humique, mais son **action fertilisante** est **importante**.

E.4.2.3.2.3 Le purin

La **composition des purins** est **très variable** puisqu'elle dépend du type d'élevage, de la durée d'élevage...

Le purin est un mélange d'urine et de jus de récupération des fumiers. Il est utilisé à dose élevée sur prairies ou sur sols nus avant labour.

Il n'a **aucun effet humique** mais une **action fertilisante intéressante**. Cependant l'utilisation répétée de purin à doses élevées acidifie les sols et occasionne la dégradation de la flore.

E.4.2.3.3 Les engrais verts

Les **engrais verts** sont mis en place pour produire une masse de matière végétale à enfouir sur place (légumineuses, crucifères ou graminées telles que le ray-grass).

Les engrais verts sont riches en sucres solubles et en azote. Leur **décomposition rapide** donne beaucoup de produits transitoires et de corps microbiens qui disparaissent rapidement.

Leur **action sur la stabilité structurale** est **brève** car ils apportent peu d'humus stable au sol : 200 à 600 kg/ha. Le coefficient isohumique k1 des engrais verts enfouis jeunes est compris entre 5 et 10%.

E.5 La fertilisation minérale et les engrais

E.5.1 Les objectifs et le raisonnement de la fertilisation

E.5.1.1 Objectifs de la fertilisation

La **fertilisation** a pour objectif de **compléter la fourniture en éléments nutritifs** de telle manière que les plantes disposent à tout moment de nutriments assimilables en quantité suffisante pour satisfaire leurs besoins.

Il existe **plusieurs types de fertilisation** :

- la **fumure de fond** : apport d'engrais et d'amendement effectué en tête de rotation. Il s'agit d'une fertilisation à l'échelle de la succession culturale ;

- la **fumure de redressement** : elle rectifie le manque d'éléments minéraux ;

- la **fumure d'entretien** : apport d'engrais effectué avant ou pendant la culture. Elle compense les exportations d'éléments minéraux par la culture précédente.

E.5.1.2 Raisonner la fertilisation

E.5.1.2.1 Connaître les besoins des plantes

Raisonner la fertilisation suppose de connaître à la fois les besoins des plantes et ce que peut lui fournir le sol.

Un élément est nécessaire à la plante lorsque celle-ci ne peut se développer en son absence. Les besoins dépendent des **objectifs de rendements fixés**.

Des **courbes d'absorption** pour une plante et un élément donnés renseignent sur ce qu'absorbent les plantes tout au long de la période de culture.

E.5.1.2.2 Connaître l'offre du sol

La plante se nourrit à partir des ions présents dans le sol, qui constituent le pool alimentaire, ensemble des ions assimilables.

L'**offre du sol** varie au cours du temps :
- en fonction des prélèvements effectués par les plantes ;
- en fonction des conditions du milieu qui, si elles sont modifiées, peuvent provoquer le changement d'état des éléments et donc leur assimilabilité.

Les teneurs en éléments minéraux du sol sont connus par l'analyse de terre.

E.5.1.2.3 Exemple : le raisonnement de la fertilisation azotée

La **fertilisation azotée** a pour but essentiel d'apporter au sol le complément nécessaire pour assurer la couverture des besoins de la culture, en temps opportun et pour un objectif de rendement donné, ajusté au potentiel du milieu.

Le **bilan azoté** permet de prévoir la fumure à apporter. Il s'agit de faire le bilan entre les fournitures et les besoins en azote. Il est réalisé entre les deux dates correspondant à la mise en place de la culture et la récolte.

FOURNITURES		PERTES
Minéralisation des résidus de récolte + Minéralisation de l'humus du sol + Minéralisation supplémentaire par arrière-effet due à l'apport régulier d'amendements organiques + Minéralisation due aux retournements de prairie + Reliquat d'azote minéral à l'ouverture du bilan + **Fumure apportée**	=	Accumulation d'azote par le peuplement végétal + Reliquat d'azote minéral à la fermeture du bilan

Les quantités d'azote fournies dépendent du précédent cultural (nature, temps de présence, devenir des résidus de récolte,...), de la nature et de la quantité des amendements organiques apportés antérieurement à la mise en place de la culture.

L'**évaluation des besoins** dépend du **type de culture** et de l'**objectif de rendement** ; le reliquat d'azote dépend de la texture du sol.

E.5.2 Les engrais

E.5.2.1 Les principaux types d'engrais

E.5.2.1.1 Les engrais renferment trois types d'éléments

Les **engrais** fournissent à la plante les **éléments minéraux** jugés insuffisants dans le sol, après avoir effectué une évaluation des besoins. Ils améliorent l'**état nutritif du sol**.

Les engrais sont soit **organiques**, transfert de déchets végétaux ; soit **minéraux**, solubles ou insolubles, simples (apport d'un seul élément minéral) ou complexes (apport de plusieurs éléments minéraux).

Ils peuvent être **apportés au sol ou sur les feuilles** par pulvérisation foliaire.

Les **engrais** peuvent apporter soit :

- des **éléments majeurs** : N, P ,K ;
- des **éléments fertilisants secondaires** : Ca, Mg, Na, S ;
- des **oligo-éléments**.

E.5.2.1.2 Classement des engrais selon leur origine

Selon leur origine, on distingue :

- les **engrais minéraux** solubles et insolubles ;
- les **engrais organiques** : fabriqués à partir de matières premières ;
- les **engrais organo-minéraux** : mélange d'engrais organiques et minéraux.

E.5.2.1.3 Classement des engrais d'après le nombre d'éléments qu'ils apportent

Les **engrais simples** apportent un seul élément fertilisant majeur (azote, phosphore ou potassium), les **engrais composés** 2 ou 3.

E.5.2.1.4 Présentation physique des engrais

Les **engrais solides** se présentent sous forme granulée, concassée, en poudre ou en perles.

Les **engrais liquides** sont de vraies solutions dans lesquelles les éléments fertilisants sont dissous.

E.5.2.2 Les engrais azotés fournisseurs d'ions NH_4^+ et NO_3^-

E.5.2.2.1 Les engrais azotés organiques libèrent régulièrement leurs éléments

Les **engrais azotés organiques**, insolubles dans l'eau, **libèrent régulièrement de l'azote**.

Ils apportent également d'autres ions (oligo-éléments) et **leur action est lente**.

E.5.2.2.2 Les engrais azotés ammoniacaux ont une action soutenue

Les **engrais azotés ammoniacaux** apportent des **ions NH_4^+** : ces ions sont solubles dans l'eau, se fixent au complexe argilo-humique, et sont **légèrement assimilables**.

Ce sont des **engrais de fond** d'**action assez rapide** dès que l'activité biologique assure une bonne nitrification.

E.5.2.2.3 Les engrais azotés nitriques ont une action immédiate

Les **engrais azotés nitriques** apportent des **ions NO_3^-**, solubles dans l'eau, **directement assimilables** car non retenus par le complexe argilo-humique.

L'action fertilisante est donc rapide ; mais ils sont également facilement **lessivables**.

Ce sont des engrais à épandre **en cours de végétation**.

E.5.2.3 Les engrais potassiques fournisseurs d'ions K^+

Tous les **engrais potassiques** apportent des **ions K^+** qui se fixent sur le complexe argilo-humique, ils sont solubles dans l'eau et **directement assimilables** par la plante.

Les engrais composés binaires ou ternaires assurent 80% de la fertilisation potassique.

Dans les engrais liquides, le taux de K_2O ne peut guère dépasser 10%.

Les engrais potassiques ont une **action décalcifiante et acidifiante** sur les sols.

E.5.2.4 Les engrais phosphatés

E.5.2.4.1 *Les engrais phosphates solubles*

Ils sont **solubles** dans l'eau, apportent des **ions HPO_4^-**, retenus sur le complexe argilo-humique.

Ils sont **immédiatement assimilables**.

Ils sont efficaces surtout dans les **sols calcaires**.

Leur action est rapide : ils peuvent être apportés peu avant la mise en place de la culture ou en cours de végétation.

E.5.2.4.2 Les engrais phosphates hyposolubles

Ils sont **peu solubles** dans l'eau, mais **rapidement solubilisés** par des acides du sol et par l'activité racinaire.

C'est l'engrais phosphaté idéal des **terres acides**.

Leur action est peu rapide, ils sont à apporter assez longtemps avant la mise en place de la culture.

E.5.2.4.3 Les engrais phosphates insolubles

Ils sont **très peu solubles** dans l'eau, solubilisés par des acides du sol, par l'activité racinaire et par les microbes.

Ils sont à utiliser dans des **sols légèrement acides**.

Leur action est très lente. Ils sont à apporter longtemps avant la mise en place de la culture.

E.5.2.5 Les engrais soufrés

Les **engrais soufrés** sont des engrais sulfatés tels que les sulfates de potassium (45% de SO_3), sulfates d'ammonium (58-60% de SO_3), les superphosphates (20% de SO_3).

Ils apportent au sol du soufre sous forme de **sulfates SO_3**.

Les engrais binaires P-K et ternaires N-P-K peuvent également renfermer des sulfates selon la matière première de base qui a servi à leur fabrication.

Les apports peuvent se faire **par voie atmosphérique** (l'absorption foliaire se fait au niveau des feuilles) ou **au sol.**

E.5.2.6 Les produits magnésiens

Divers produits magnésiens peuvent être source de magnésium :

- les **sels solubles de magnésium** (sulfate, chlorure, nitrate) fournissent du magnésium aux végétaux et augmentent la teneur en Mg fixé sur le complexe adsorbant ;

- les **engrais magnésiens** sont les nitrates de chaux et de magnésie (5% de MgO), le sulfo-nitrate magnésien (5% de MgO), le sulfate de magnésium (15% de MgO), la kierésite (25% de MgO)... ;

- les **amendements magnésiens et calcaires-magnésiens** sont également source de magnésium dans des quantités variables selon le type d'amendement.

Les engrais peuvent être apportés **au sol**, mais seule une **pulvérisation foliaire** de solution contenant du magnésium permet de remédier à une carence en magnésium observée en plein stade végétatif.

E.5.2.7 Les produits calcaires

Le **calcium** est apporter au sol sous forme d'**amendements calcaires** : chaux, craie, plâtre...

E.5.2.8 La fertilisation en oligo-éléments

E.5.2.8.1 La source ou forme de l'oligo-élément à apporter

Il existe de nombreux produits spécifiques pour apporter des oligo-éléments aux cultures.

Ces **sources d'oligo-éléments** contiennent des composés minéraux, des chélates de synthèse, des complexes organiques et des produits frittés.

Les chélates sont les formes organiques les plus utilisées pour l'apport d'oligo-éléments.

L'**oligo-fertilisation** se fait surtout à partir de produits spécifiques mais ces éléments peuvent être également apportés avec les engrais fertilisants N, P, K dans lesquels ils sont contenus en faible quantité.

E.5.2.8.2 Les modes d'apports des oligo-éléments

L'**oligo-fertilisation** peut se faire **soit au sol** (pour les éléments Fe, Zn, Cu, Mo, B) **soit par pulvérisation foliaire** (pour tous les oligo-éléments).

La **pulvérisation foliaire** est pratiquée pour **remédier rapidement à des situations de carence en oligo-élément** observées en plein stade végétatif. L'absorption des oligo-éléments se fait alors au niveau des feuilles.

La **pulvérisation foliaire** présente vis-à-vis de la fertilisation au sol les avantages suivants :

- la correction en oligo-élément est rapide ;
- l'économie en produit fertilisant est importante ;
- la carence en oligo-élément est souvent liée à un problème d'assimilation au niveau racinaire plutôt qu'à une teneur faible dans le sol. Sur feuilles, l'élément est directement assimilé.

E.6 Le travail du sol

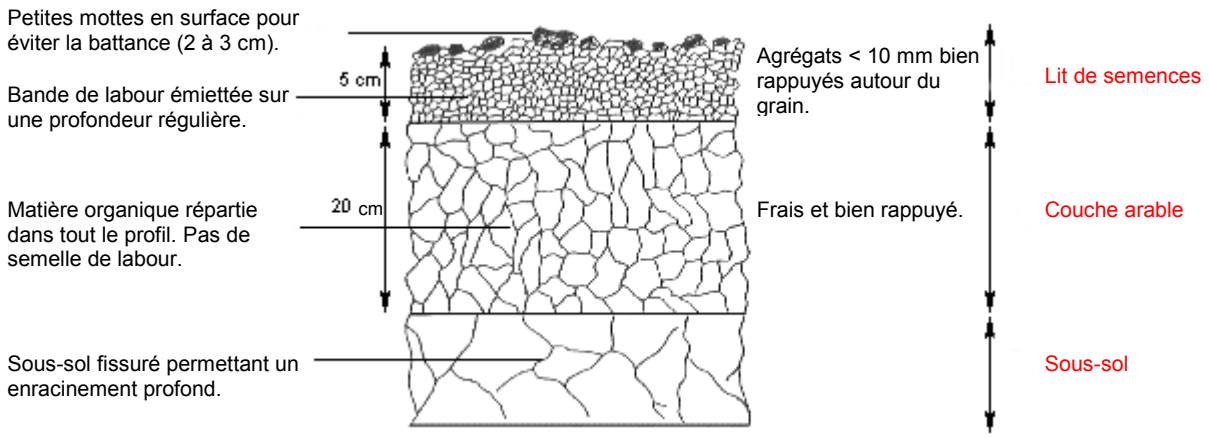
E.6.1 Objectifs du travail du sol

E.6.1.1 Obtenir le profil cultural recherché

E.6.1.1.1 Créer un état structural favorable

Au sein d'un **itinéraire technique**, les opérations de travail du sol ont, entre autres, pour objectif de créer un état structural favorable.

Il s'agit, en interaction avec les facteurs du climat, de créer les conditions physiques favorisant l'implantation, la croissance et le développement du peuplement cultivé par la maîtrise des flux d'eau, de gaz et de chaleur dans le sol.



Source : Le Sol. L'état physique et les modifications. VILAIN

E.6.1.1.2 Le lit de semences

Le **lit de semences** correspond à la couche du sol où les graines sont déposées et où les conditions sont favorables à leur germination.

Après le labour, les actions culturales pour la **préparation du lit de semences** ont pour but de rendre le profil homogène dans sa structure (tri entre terre fine et mottes) et son tassement et dans la répartition des matières organiques et des engrais.

L'**état structural du lit de semences** joue en effet un rôle important dans la germination des semences et la levée des plantules :

- il doit permettre le **transfert de l'eau, de la chaleur et de l'oxygène** ;
- il influe sur la **profondeur** et la **régularité du semis** et donc sur la position des semences vis-à-vis des gradients hydriques, thermiques et de la concentration en oxygène ;
- il conditionne le **contact entre les semences et les éléments structuraux**, contact qui détermine la surface d'absorption de l'eau et des gaz ;
- certains éléments structuraux du lit de semences (les mottes par exemple) peuvent constituer un obstacle mécanique à la levée des plantules.

E.6.1.1.3 La couche arable

La **couche arable** est la **couche de sol travaillée**, sa profondeur dépend de la profondeur du labour.

Il ne faut pas que la couche arable soit trop compacte sinon la pénétration racinaire se fait mal et l'aération est mauvaise. La macroporosité ne doit pas non plus être trop importante car le contacte terre - racines doit être assuré.

La **profondeur** de cet horizon est de **20 à 30 cm**, elle correspond à la profondeur du labour.

E.6.1.1.4 L'horizon sous la couche labourée

L'**horizon sous la couche labourée** doit être colonisé par les racines.

Entre la couche labourée et le sous-sol, la présence d'une semelle de labour peut constituer un obstacle à la colonisation radiculaire. Elle peut être brisée par décompactage et sous-solage.

De même, si la couche labourée est compacte, les racines ne colonisent pas l'horizon sous-jacent, il s'agit de l'effet d'ombre.

E.6.1.2 Contrôler la végétation adventice

Un des **objectifs du travail du sol** est la **lutte contre les mauvaises herbes** qui rentrent en concurrence avec le peuplement végétal.

La **préparation du sol** permet de **lutter mécaniquement** contre les adventices :

- par destruction en cours de végétation : binage, sarclage ;
- par destruction des racines des adventices ;
- par destruction des semences d'adventices.

Gaillet gratteron

Véronique à feuille de lierre

Source : ITCF

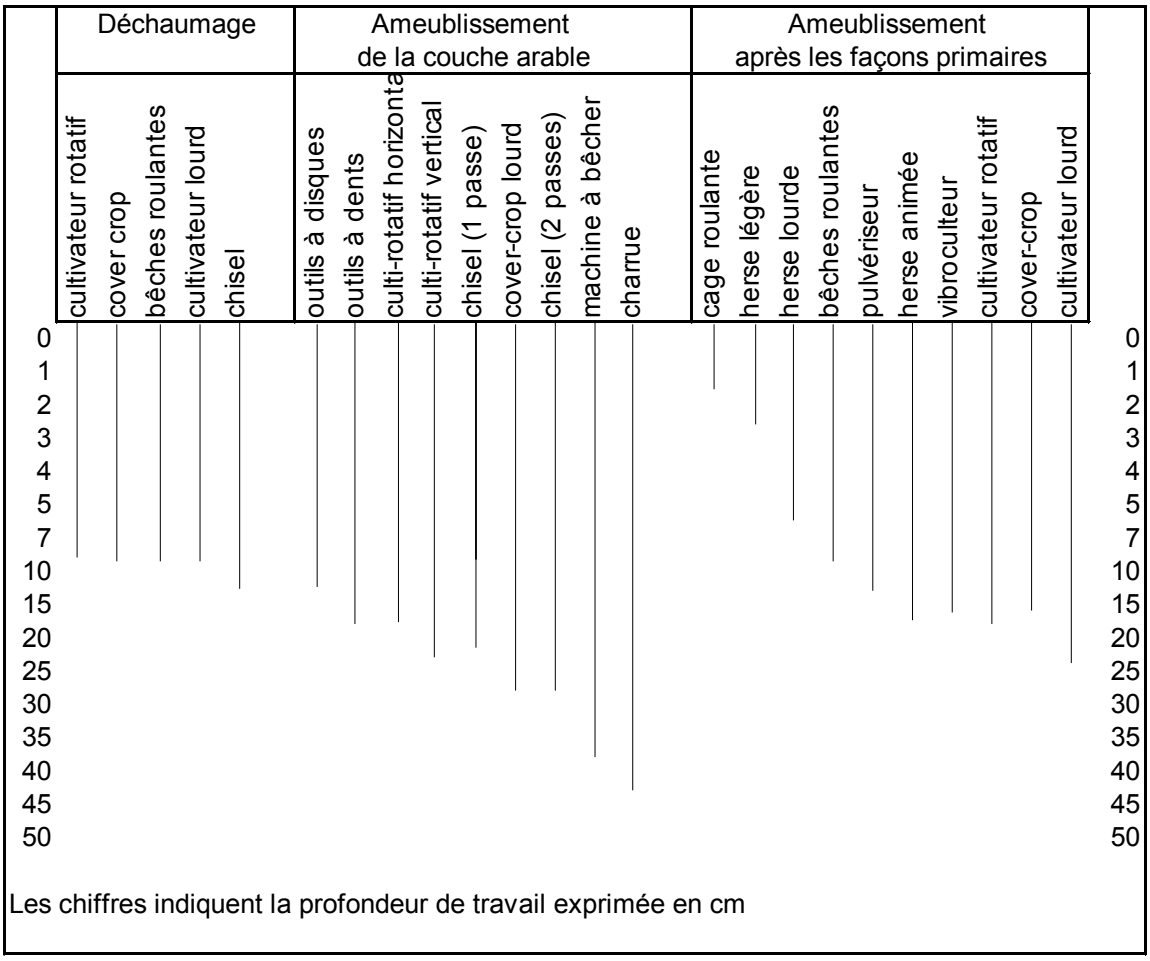
E.6.1.3 Enfouir les résidus culturaux, les amendements, les engrais et les pesticides

En fin de culture, l'**enfouissement des résidus culturaux** permet de dégager le sol, de restituer la matière organique au sol et de maintenir la stabilité structurale.

L'**enfouissement et le mélange** permettent également de mettre sous terre et de répartir de façon homogène **les engrais, les amendements et les produits phytosanitaires**.

E.6.2 Les diverses façons culturales

E.6.2.1 Les principaux outils de travail du sol



Source : Les matériaux de travail du sol, Camille CEDRA, collection FORMAGRI

E.6.2.2 Mode d'action des outils

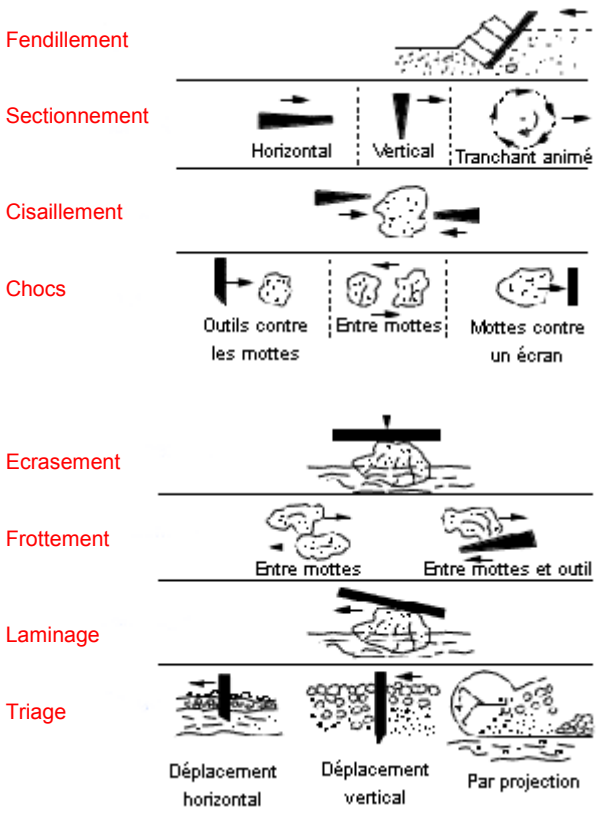
Les outils ont pour objectifs :

- de fendiller la structure ;
- de diminuer la taille des mottes en les fragmentant ;
- de déplacer les mottes verticalement et horizontalement ;
- de retourner la terre.

La **fragmentation des mottes** peut se faire ainsi :

- les mottes de terre peuvent être ciselées entre des pièces mobiles comme des herses animées ;
- les mottes se disloquent après des chocs entre elles ;
- les mottes s'émiettent après passage du rouleau.

Le passage d'un outil à dents verticales permet de faire tomber la terre fine au fond du sillon. Puis le passage d'un rouleau écrase les mottes en surface.



Les différents modes d'action des outils

Source : Les matériels de travail du sol, semis et plantation, collection FORMAGRI volume 3

E.6.2.3 Les accidents structuraux induits par les pratiques culturales

Des façons culturales reprises trop souvent ou un travail du sol effectué dans des conditions climatiques non adaptées (sol très humide...) entraînent la dégradation de la structure :

- un excès de terre fine : le sol peut devenir battant ;
- les mottes se dessèchent trop si l'intervalle de temps entre deux actions est long, il est difficile de reprendre le sol ;
- l'adhérence du sol est élevée si le sol est travaillé par temps humide, la structure devient compacte ;

- des mottes compactes se forment si le passage d'outils est trop fréquent.

E.6.2.4 Les façons préalables : déchaumage, sous-solage et décompactage

E.6.2.4.1 Déchaumage

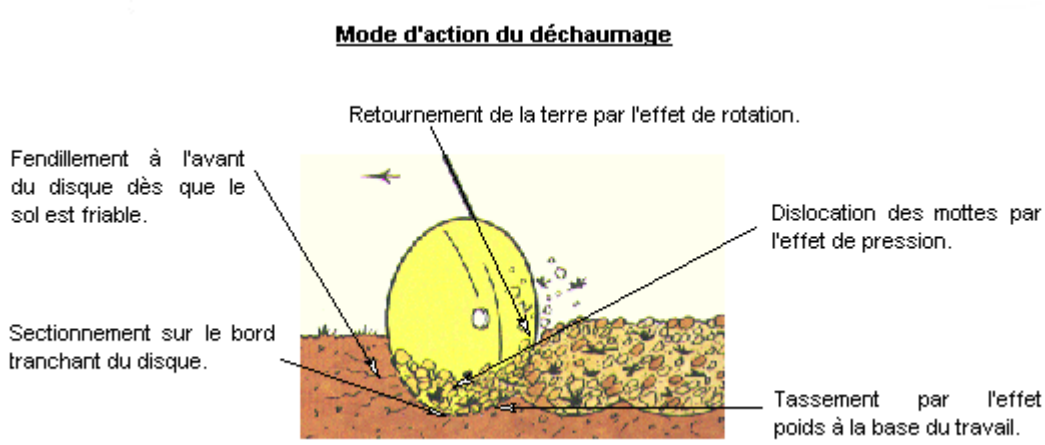
E.6.2.4.1.1 Objectifs du déchaumage

Après la récolte des céréales et avant le labour, le **déchaumage** a pour objectifs :

- préincorporer les pailles afin d'accélérer leur décomposition ;
- lutter contre les adventices en les sectionnant ;
- faire lever les graines de mauvaises herbes dans les 5 à 10 premiers cm ;
- créer une couche de terre sèche pour limiter l'évaporation de l'eau.

Le déchaumage est déconseillé :

- sur une terre battante afin d'éviter la création d'une importante quantité de terre fine ;
- s'il existe une semelle de labour pour éviter la formation d'une nappe au-dessus de la semelle.



Source : Choisir les outils pour le travail du sol, ITCF, 1987

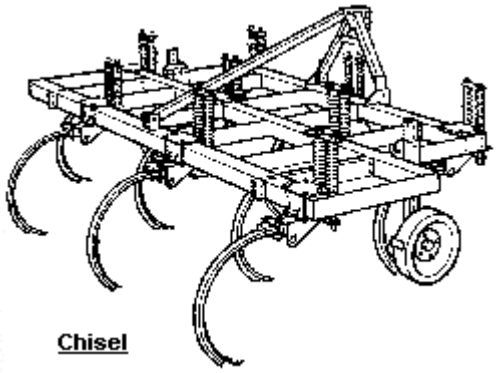
E.6.2.4.1.2 Outils utilisés pour le déchaumage

Deux types d'outils sont utilisés pour **déchaumer** :

- les **outils à disques** : ils font généralement un travail superficiel. Ce sont les pulvériseurs, les cover-crops et les déchaumeuses à disques ;

Cover-crop

- les **outils à dents** : ils peuvent travailler plus ou moins profond (15-25 cm). Ce sont les chisels et les cultivateurs.



Chisel

E.6.2.4.2 Sous-solage et décompactage

E.6.2.4.2.1 Compaction du sol

La **compaction** de la structure du sol, suite à un nombre important de passages d'outils, entraîne une diminution de la porosité, la structure devient continue, il y a création de mottes qui sont ultérieurement difficiles à réduire. Le phénomène est d'autant plus important que le travail du sol se fait alors que le taux d'humidité est élevé.

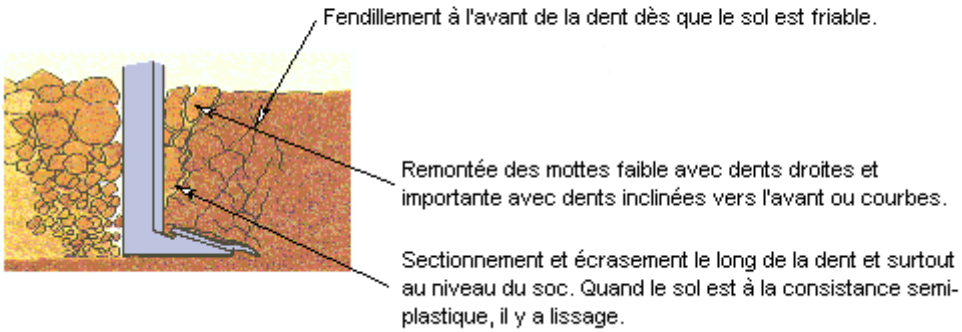
Pour **éviter le compactage du sol**, il suffit de **diminuer la pression exercée au sol** par les engins (par une augmentation de la surface de contact : pneus plus larges...) **et le nombre de passages** (combiner les outils de travail du sol), et agir sur la stabilité structurale du sol.

E.6.2.4.2.2 Objectifs du sous-solage et du décompactage

Le **décompactage** et le **sous-solage** permettent de briser les états structuraux compacts et tassés en ameublissant le sol.

L'objectif de ces actions est d'éclater et de diviser les horizons profonds compactés afin de faciliter la pénétration racinaire et d'augmenter la perméabilité, et également de disloquer les semelles de labour (décompactage).

Mode d'action du décompactage



Source : Choisir les outils pour le travail du sol, ITCF, 1987

E.6.2.4.2.3 Les outils utilisés pour sous-soler et décompacter

Pour obtenir un éclatement maximum lors du sous-solage et du décompactage, il faut travailler sur une terre sèche avec sous-soleuse et décompacteur.

La **sous-soleuse**, à un étançon droit, convient pour l'ameublissement en profondeur ; le **décompacteur**, doté de plusieurs dents courbes, agit sur une profondeur de 50 à 60 cm.

Décompacteur

Source : CEMAGREF

E.6.2.5 Les façons principales : les labours

E.6.2.5.1 Les objectifs du labour

Les **objectifs du labour** sont :

- ameublir la couche arable, ce qui facilite la vitesse de ressuyage et la pénétration racinaire ;

- enfouir et mélanger les engrais (fumure de fond), amendements, matières organiques apportées, résidus culturaux et adventices, l'enfouissement des résidus culturaux constitue une restitution des éléments végétaux du sol en profondeur ;

- détruire par enfouissement certains adventices et parasites ;

- créer un relief qui permet de diminuer l'évaporation et favoriser l'économie d'eau en facilitant l'infiltration et ainsi éviter le phénomène de battance.

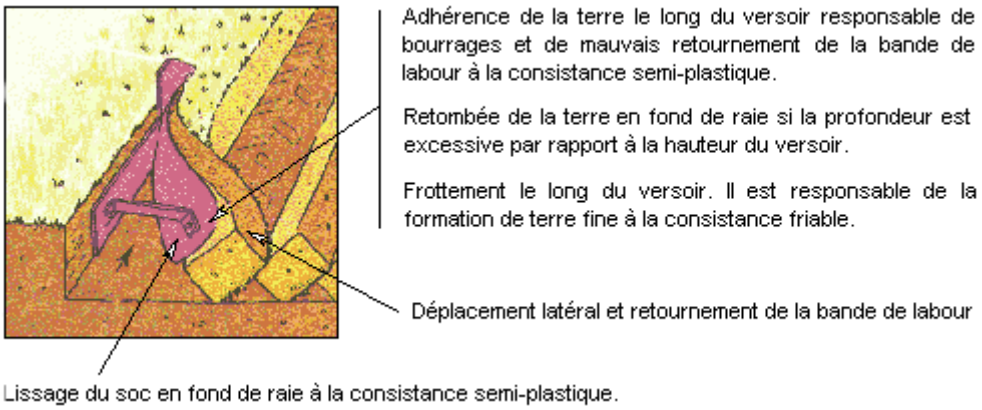
Le labour est souvent l'étape initiale des itinéraires du travail du sol

Source : CEMAGREF

E.6.2.5.2 Action de la charrue

La **charrue** est l'outil utilisé pour **labourer**.

Le labour consiste à **découper une bande de terre et la retourner** : le labour donne donc un **relief accentué** au sol. Il se caractérise par son aspect superficiel : déformation des bandes de terre et irrégularités de surface. Il existe **plusieurs types de labours**.



Source : Choisir les outils pour le travail du sol, ITCF, 1987

E.6.2.6 Les façons complémentaires : les pseudo-labours et les façons d'entretien

E.6.2.6.1 Les pseudo-labours

Les **pseudo-labours** sont des reprises de labour au printemps. Ils sont réalisés pour ameublir la couche arable. Le sol est travaillé sur une profondeur de 10 à 15 cm, sans être retourné.

Les pseudo-labours sont réalisés avec :

- des **instruments à disques** (pulvériseurs, déchaumeuses, cover-crops), ils servent à sectionner les mottes et mélanger les éléments fins et grossiers ;
- des **outils à dents** ;
- des **outils animés** (cultivateurs, herses rotatives et alternatives).

E.6.2.6.2 Reprise profonde des labours

La **reprise** consiste à passer un outil **sur une terre déjà travaillée** depuis quelques temps.

Il y a **reprise profonde** de labour s'il persiste dans la couche arable de grosses mottes de terre susceptibles de gêner la préparation du lit de semence. La profondeur d'une reprise profonde est **supérieure à 10 cm**.

E.6.2.6.3 Reprise superficielle

La **reprise superficielle** consiste à passer un outil sur une terre déjà travaillée depuis quelques temps. **La profondeur de travail ne dépasse pas 10 cm**.

Les objectifs de la reprise superficielle sont :

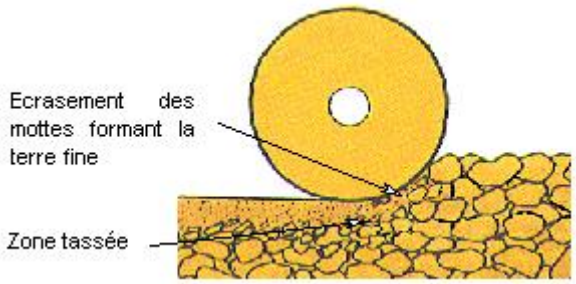
- **niveler la surface du sol** suite à un labour (création de grosses mottes) pour faciliter l'apport d'engrais et de désherbants en présemis ;
- **émietter la surface du sol**.

E.6.2.6.4 Les façons d'entretien : roulage, binage

E.6.2.6.4.1 Roulage

A la préparation du lit de semences, les objectifs du roulage sont :

- **écraser les mottes** pour les réduire en terre fine ;
- **tasser le sol** pour assurer une meilleure circulation de l'eau jusqu'à la graine et un meilleur cheminement des racines, sans compacter la terre ;
- **aplanir la surface** du lit de semences ;
- **améliorer le contact terre-graine** après le semis.

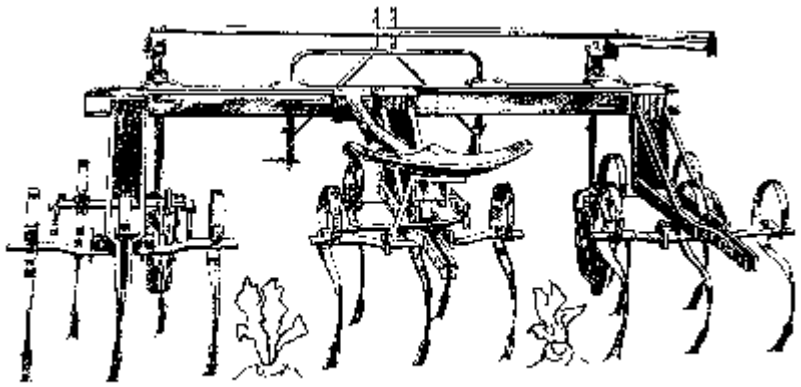


Source : Choisir les outils pour le travail du sol, ITCF, 1987

E.6.2.6.4.2 Binage

Le **binage** consiste à **ameublir la surface du sol** ou à **rompre la couche superficielle** pour d'une part, limiter l'évaporation et d'autre part, faciliter l'infiltration des pluies.

Il peut également servir à éliminer mécaniquement les mauvaises herbes.



Bineuse portée à dents pour trois entre-rangs

E.6.3 Simplification du travail du sol

E.6.3.1 Intérêt de la simplification du travail du sol

La **simplification du travail du sol** consiste à **limiter le nombre de passages d'outils** et surtout à **supprimer le labour**.

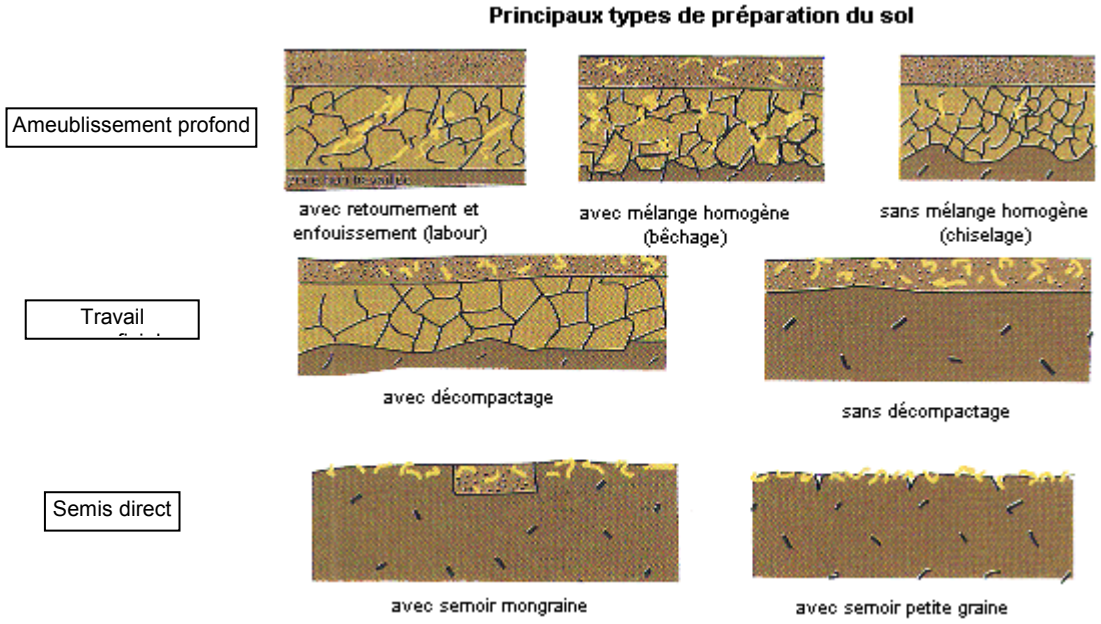
Ainsi, elle présente plusieurs **avantages** :

- diminution des charges fixes d'équipement ;
- diminution des charges de main-d'œuvre ;
- diminution des charges de la consommation en carburant, en vue de l'obtention d'un même résultat sur la culture.

Mais la simplification du travail doit être basée sur un **raisonnement agronomique**.

Trois **modalités principales de simplification** peuvent être identifiées :

- la **suppression d'opérations culturales superflues** du fait de l'état initial du sol ou de l'effet attendu du climat, ou même néfastes : affinement excessif du lit de semences, compactage de la couche sous-jacente... ;
- utilisation en un seul passage d'**outils combinés multifonctions** ;
- **remplacement** de certaines opérations de travail du sol par des interventions techniques d'une autre nature et plus économiques : traitements chimiques, utilisation de semoirs opérant sans préparation du sol...



Source : Tiré à part de Perspectives agricoles, ITCF, 1996

E.6.3.2 Le labour n'est pas toujours indispensable

La **suppression du labour** est basée sur un **raisonnement agronomique**.

Le labour n'est pas toujours indispensable à la préparation du sol, mais il ne peut être supprimé dans les cas suivants :

- si la couche arable est compactée ;

- si les résidus végétaux risquent de provoquer le bourrage des outils de travail du sol ;
- si la qualité de ressuyage du sol est mauvaise.

Lorsqu'il n'y a pas ces problèmes, on peut envisager un **travail superficiel du sol** ou un **semis direct**. Il y a ainsi **économie de temps et d'énergie**.

De plus, la réussite du non-labour passe également par des **précautions à prendre** :

- éviter de dégrader la structure du sol ;
- soigner le broyage et l'éparpillement des pailles ;
- maintenir les parcelles propres vis-à-vis des adventices par des désherbages en interculture ;
- adapter la dose de semis et la qualité du lit de semences.

E.6.3.3 Le travail superficiel

On parle de **travail superficiel** lorsqu'**aucun travail du sol en profondeur** n'est réalisé. Il passe ainsi par la **suppression du labour**.

Il a pour objectifs :
- d'ameublir les 10 premiers cm ;
- d'enfouir les résidus de récolte.

Il peut être précédé d'un **décompactage**. Ainsi en profondeur, le sol est simplement fissuré et l'horizon superficiel est travaillé finement et bien nivelé pour y localiser aisément les semences.

Les **outils** utilisés pour le **travail superficiel** sont :
- les cultivateurs lourds à dents flexibles ;
- les cultivateurs légers ;
- les cultivateurs rotatifs à axe horizontal.

E.6.3.4 Le semis direct

Le **semis direct sans travail du sol** au préalable permet de regrouper en **un seul passage** les actions mécaniques indispensables à la mise en place des semences.

Il se limite au **travail sur la ligne de semis**. Pour être rentable et efficace, le semis direct nécessite un bon état de surface et une maîtrise des mauvaises herbes.

Le **travail minimum** du sol présente les **avantages** suivants :

- il y a une **économie** du temps de travail, du carburant des engins, etc. ;
- la structure risque moins d'être tassée du fait du **nombre réduit de passages d'engins** ;
- la quantité de terre fine formée est moindre, le sol étant moins travaillé.

Pour le semis direct, on utilise soit des semoirs spécialisés, soit des semoirs classiques suffisamment robustes, équipés d'organes de terrage adaptés.