

Le sol (Pédosphère)

4.1. Structure de la terre :

La terre est composée de couches concentriques distinctes, différencierées par leur composition chimique et leur état physique (solide, liquide, ductile). Ces couches sont, de l'extérieur vers l'intérieur (Fig. 4.1) :

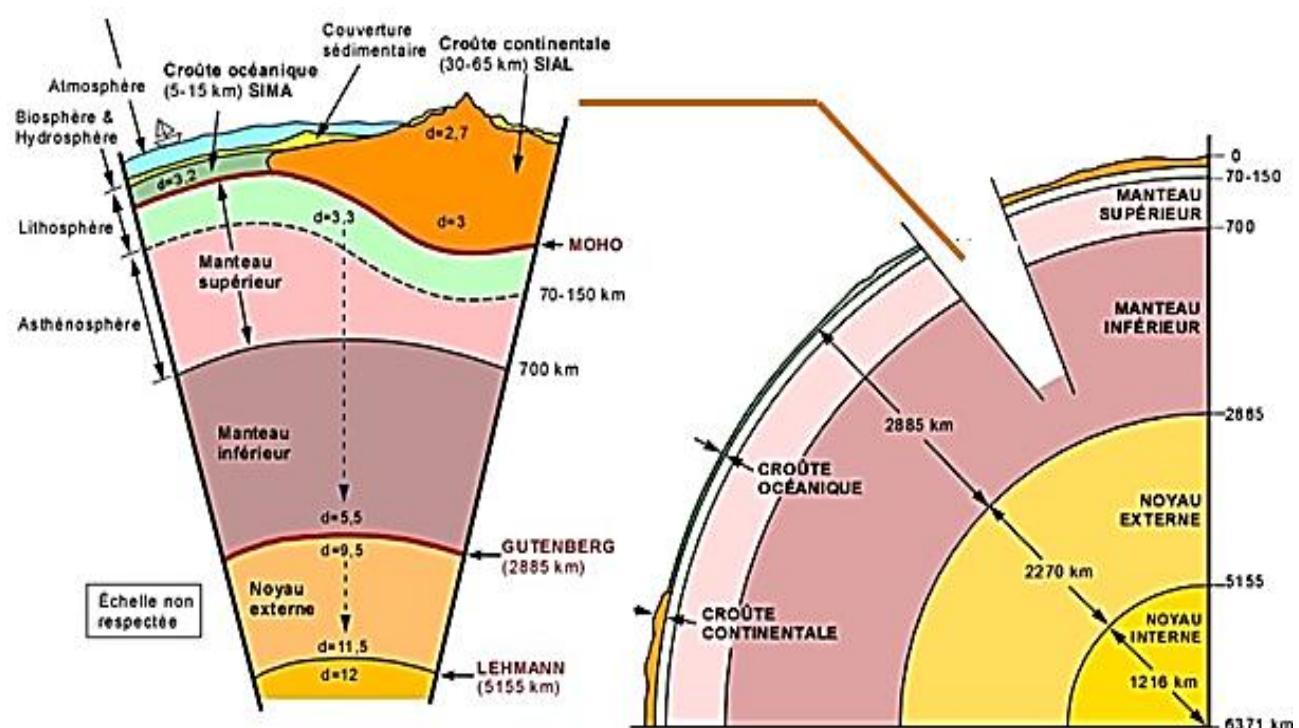


Figure 4.1 : Structure de la terre.

4.1.1. La croûte terrestre :

4.1.1.1. La croûte continentale:

La croûte continentale solide, épaisse moyenne (30 à 70 km) essentiellement granitique et surmontée par endroits de roches sédimentaires. Elle est plus épaisse que la croûte océanique. Elle était anciennement appelée SIAL (Silicium + Aluminium).

4.1.1.2. La croûte océanique :

La croûte océanique est une couche solide et relativement fine, dont l'épaisseur varie entre 5 et 15 kilomètres. Elle est principalement constituée de roches basaltiques, une composition riche en silicium et magnésium qui lui vaut également le nom de SIMA.

4.1.2. Le manteau :

C'est la couche la plus épaisse, représentant 82% du volume de la terre, son épaisseur est de 2900 km. Il est principalement composé de roches silicatées riches en fer et magnésium (péridotite). Le manteau se divise en manteau inférieur solide et manteau supérieur principalement plastique

4.1.2.1. Le manteau supérieur :

Le manteau supérieur est principalement constitué de roches comme la péridotite. Bien que solide jusqu'à environ 700 km de profondeur, il est moins visqueux et plus ductile que le manteau inférieur, permettant des déformations lentes sur de vastes échelles de temps. Sa limite avec la croûte terrestre est marquée par **la discontinuité de Mohorovicic**.

4.1.2.2. Le manteau inférieur

Le manteau inférieur s'étend d'environ 700 km à 2 900 km de profondeur. À l'état solide, sa composition diffère nettement de celle de la croûte continentale : il est peu riche en silice mais très riche en oxyde de magnésium (MgO). D'un point de vue chimique, on le qualifie donc de manteau SIMA (pour Silicium et Magnésium), par opposition au SIAL (Silicium et Aluminium) caractéristique de la croûte continentale.

a. La lithosphère : Il s'agit de l'enveloppe rigide externe de la terre. Elle comprend la croûte terrestre (divisée en plaques tectoniques) et la partie supérieure du manteau, jusqu'à une profondeur variant entre 100 et 200 km. C'est à cette limite que les roches mantelliques (péridotites) commencent à se ramollir sous l'effet de la température et de la pression. La lithosphère intègre notamment **la discontinuité de Mohorovicic**, qui marque la transition entre la croûte et le manteau.

b. L'asthénosphère : Située juste sous la lithosphère, cette couche du manteau supérieur est partiellement ductile et moins rigide. Elle permet, sur des échelles de temps géologiques, les mouvements lents de convection qui entraînent le déplacement des plaques lithosphériques.

4.1.3. Le noyau est composé de 2 couches très différentes : le noyau externe liquide et le noyau interne solide.

4.1.3.1. Le noyau externe : est la couche terrestre située entre environ 2 900 et 5 155 km de profondeur. Il est principalement à l'état liquide et composé d'environ 80 à 85 % de fer, de 5 % de nickel, ainsi que de 10 à 12 % d'un ou plusieurs éléments légers non encore clairement identifiés (soufre, oxygène, silicium ou carbone). Sa température moyenne atteint près de 4000 °C, sa densité est d'environ 10, et sa viscosité reste faible, estimée entre 1 et 100 fois celle de l'eau. Sa limite supérieure correspond à **la discontinuité de Gutenberg**, qui marque la transition entre le manteau et le noyau.

4.1.3.2. Le noyau interne (ou « graine ») est la sphère solide située au centre de la terre. Il est essentiellement composé d'un alliage métallique de fer (environ 80 %) et de nickel (environ 20 %), ce qui lui vaut l'appellation abrégée **NIFE**. Bien que sa température dépasse 6 000 °C, une pression gigantesque d'environ 3,5 millions de bars (350 GPa) le maintient à l'état solide. Sa densité est d'environ 13. Il se forme par cristallisation progressive du fer présent dans le noyau externe liquide. Sa limite supérieure est marquée par **la discontinuité de Lehmann**, qui sépare le noyau interne solide du noyau externe liquide.

4.2. Le sol :

4.2.1. Définition :

La lithosphère (du grec lithos, pierre, et sphaira, sphère) est l'enveloppe rigide externe de la terre, d'une épaisseur moyenne d'environ 100 km. Elle est constituée de la croûte terrestre solide et de la partie supérieure du manteau.

Sa couche la plus superficielle forme le sol (ou pédosphère). Celui-ci correspond à la surface meuble de la croûte, d'une épaisseur variant de quelques décimètres à quelques mètres. Il s'agit d'une interface dynamique entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la roche mère sous-jacente.

4.2.2. Constituants du sol :

Le sol n'est pas un simple matériau inerte, mais un système complexe et hétérogène, composé d'un mélange de substances minérales et organiques. Sa formation et son évolution résultent de l'interaction constante de facteurs climatiques, hydrologiques, biologiques (organismes et végétation) et géologiques. C'est dans cette fine pellicule que se concentre et se développe l'essentiel de la vie terrestre.

Le sol contient des composés de diverses sortes :

- Composés inorganiques (minéraux),
- Matière organique morte et en partie décomposée,
- Organismes de sols,
- Air contenu dans le sol et eau présente dans le sol, dans laquelle des composés inorganiques et organiques sont en partie dissous (appelée « solution du sol »).

Un sol modèle typique situé dans une zone verte contient environ **25% d'air** et **25% d'eau** par rapport à son volume ; **45% sont des composés minéraux** et **5% sont de nature organique**. Il existe des sols contenant plus de 30% de substances organiques (Fig. 4.2).

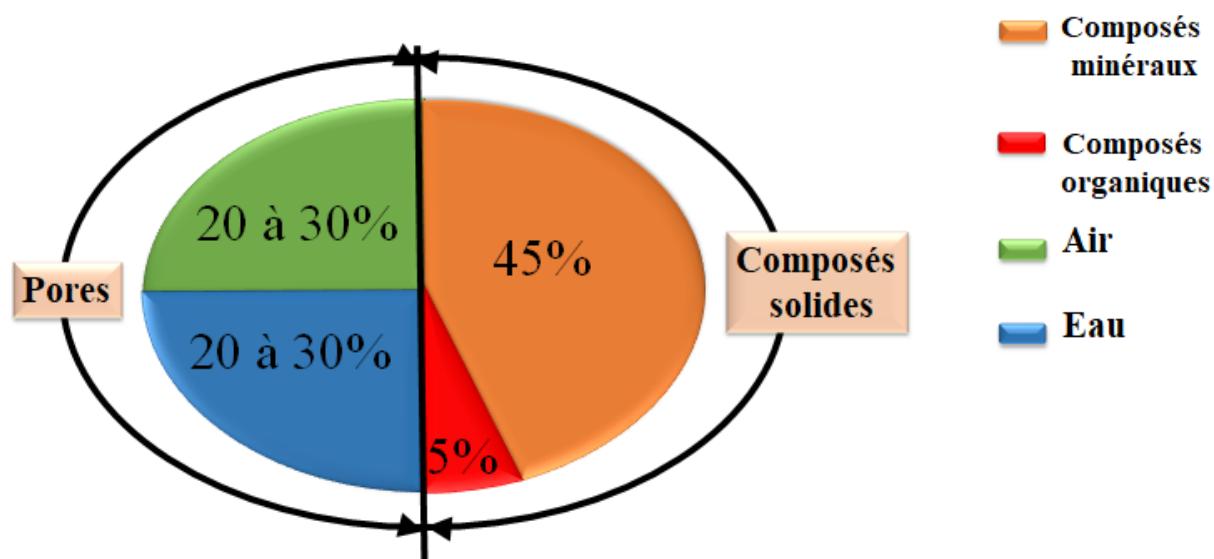


Figure 4.2 : Constituants du sol.

Le développement, la structure et la végétation d'un sol dépendent de plusieurs facteurs interdépendants (Fig. 4.3). Le climat détermine les apports en eau et en air à partir de l'atmosphère, ce qui conditionne directement la vie du sol. Dans les couches supérieures, l'air circule librement, offrant un milieu aérobie essentiel aux microorganismes, à la respiration des racines et aux champignons mycorhiziques qui vivent en symbiose avec les plantes. En revanche, plus on s'enfonce dans le sol, plus la teneur en oxygène diminue, créant un milieu anaérobie dans les profondeurs. Cette stratification verticale s'accompagne d'une évolution de la composition du sol : les éléments biotiques et l'humus prédominent en surface, tandis que les éléments minéraux deviennent majoritaires en profondeur.

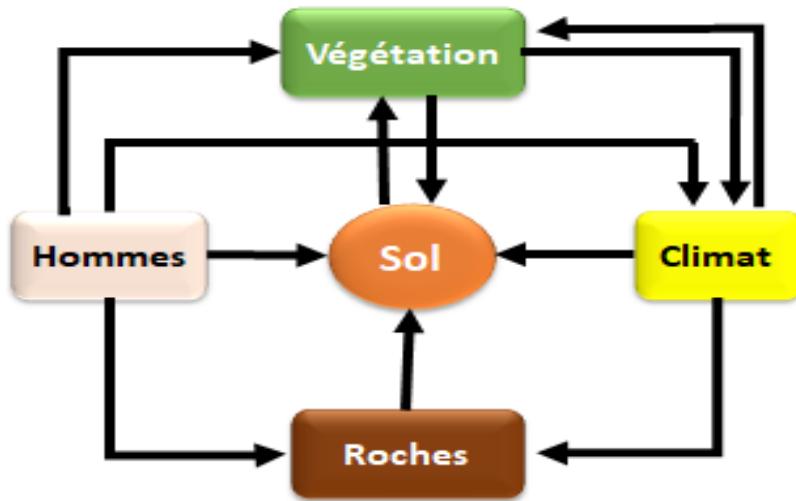


Figure 4.3 : Synergie entre quelques facteurs caractéristiques pour le développement des sols.

4.2.3. Propriétés du sol :

Le sol forme un volume complexe dont la compréhension nécessite une observation en profondeur. Une coupe dans le terrain, ou profil pédologique, révèle directement cette réalité : on y observe plusieurs couches superposées, distinctes par leur couleur et leur structure, appelées horizons.

L'horizon le plus profond correspond généralement à la roche mère, sur laquelle se sont formées et accumulées les couches supérieures au fil du temps. L'ensemble de ces horizons et leur agencement constitue précisément le profil du sol, dont les caractéristiques varient considérablement selon les types de sols.

Pour caractériser chaque horizon, les pédologues analysent un ensemble de propriétés morphologiques telles que :

- Sa composition (constituants),
- Sa texture,
- Sa structure,
- Sa couleur,
- Sa position relative par rapport aux autres horizons.

La combinaison de ces critères a permis de définir plus de 70 types d'horizons différents. Chacun est identifié par un code international de lettres, comme O, A, B, E, C ou R, selon sa nature et sa position dans le profil (Fig. 4.4).

LES HORIZONS DU SOL

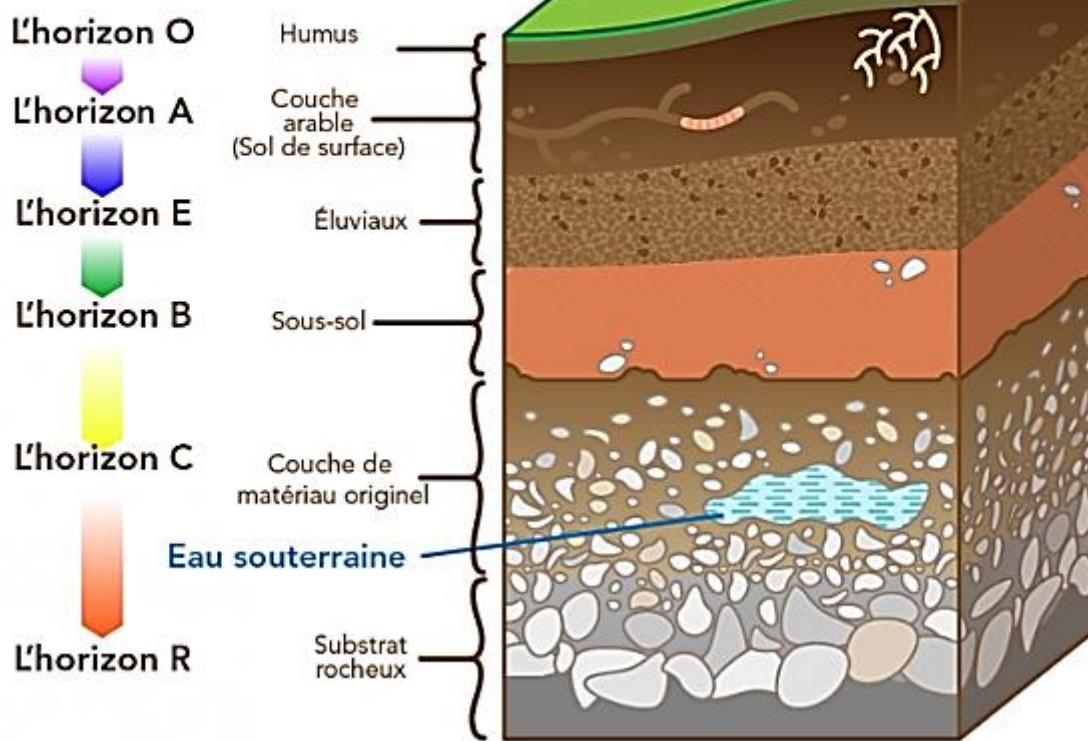


Figure 4.4 : Horizons et différenciation des sols.

Voici quelques-uns des horizons les plus courants:

- **L'horizon O (ou humus)** est essentiellement composé de matière organique, comme des feuilles ou des insectes en décomposition. En fonction du sol, la couche O peut être très épaisse ou inexistante.
- **L'horizon A (ou couche arable ou sol de surface)** est essentiellement constitué de minéraux et de matières organiques décomposées. C'est là que poussent la plupart des racines des végétaux.
- **L'horizon E est aussi appelé horizon éluvial.** L'argile, les minéraux et les matières organiques s'échappent de cette couche. Le sable et les particules de quartz du limon restent. On le trouve souvent dans les sols plus âgés et ceux des forêts.
- **L'horizon B (ou sous-sol)** est constitué d'argile et de dépôts minéraux ainsi que de matières organiques, mais en quantité moindre que les couches supérieures.

- **L'horizon C (ou couche de matériau originel)** est constitué de roches quasiment non altérées et de très peu de matières organiques. C'est à partir de lui que le sol se développe. Aucune racine ne pousse dans cette couche.
- **L'horizon R (ou substrat rocheux)** est constitué d'une masse de roches comme le granit, le calcaire ou le grès.

4.2.3.1. Propriétés physiques :

A. Structure :

La structure constitue un critère de classification important pour les sols, car elle renseigne sur leur degré d'évolution.

On distingue plusieurs types de structures, classés ici par taille croissante des agrégats :

- Absence de structure (massive ou compacte)
- Structure pulvérulente (sol meuble et fin)
- Structure grumeleuse (agrégats arrondis de 1 mm à 1 cm)
- Structure polyédrique (agrégats anguleux de quelques centimètres)
- Structure prismatique (éléments allongés dépassant 15 cm)

Par ailleurs, la présence, l'abondance et l'état des éléments grossiers (graviers, concrétions) constituent un autre élément important. Leur observation permet d'évaluer l'avancement de l'altération du sol et donne des indications sur la nature de la roche mère d'origine.

B. Couleur :

La couleur de chaque horizon d'un sol est déterminée avec précision à l'aide d'une charte de couleur, en spécifiant si l'échantillon est observé à l'état humide ou sec. Cette caractéristique est fondamentale pour différencier les horizons et constitue un indicateur clé de plusieurs paramètres liés à la formation et à l'évolution du sol (par exemple, la présence de matière organique, d'oxydes de fer ou le degré d'hydromorphie).

C. Texture :

Les propriétés physiques d'un sol dépendent largement de la taille des particules minérales qui le composent. Ces particules sont classées en familles granulométriques distinctes (**Fig. 4.5**):

- **Argiles** : diamètre < 0.002 mm (< 2 μm)
- **Limons (silts)** : diamètre entre 0.002 et 0.05 mm (2 - 50 μm)
- **Sables fins** : diamètre entre 0.05 et 0.2 mm (50 - 200 μm)

- **Sables grossiers:** diamètre entre 0.2 et 2 mm (200 - 2000 μm)
- **Éléments grossiers (graviers, cailloux)** : diamètre > 2 mm

La classe texturale d'un sol (ex. : argileux, limoneux, sableux) est définie par le pourcentage relatif de ces différentes fractions dans l'échantillon.

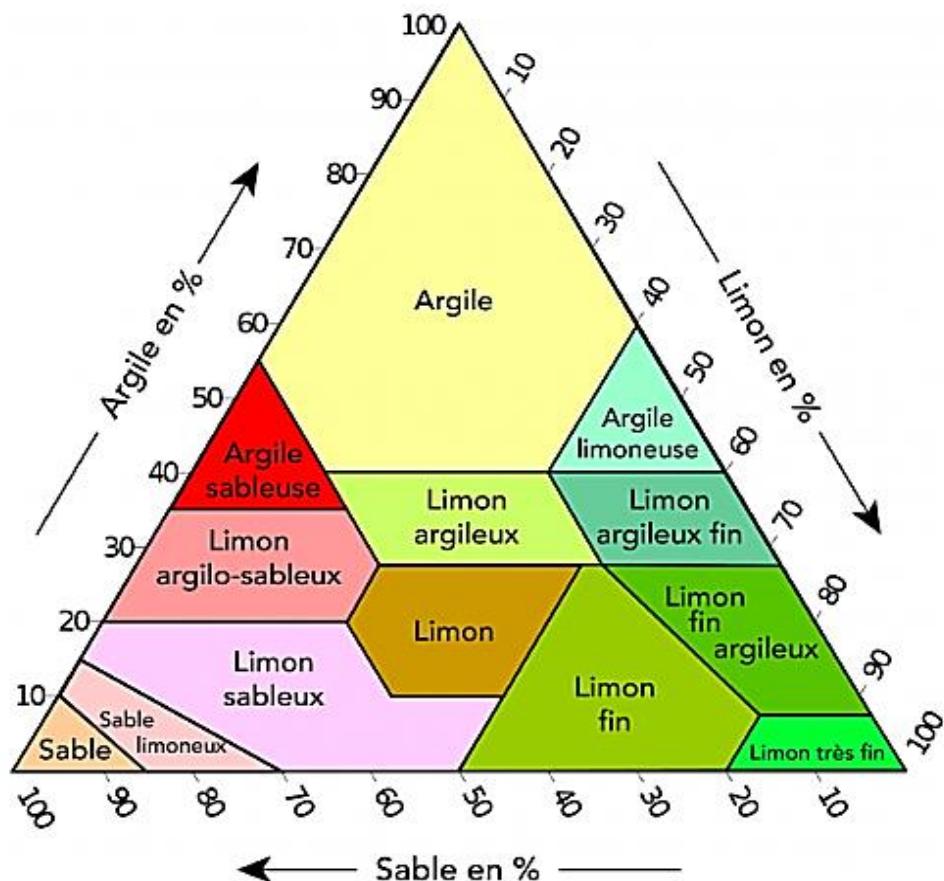


Figure 4.5 : Triangle de textures des sols.

D. Porosité : Il s'agit du volume des vides. Ils sont remplis d'air ou d'eau, en pourcentage du volume total. Les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat sont influencées par la porosité.

E. Perméabilité du sol : La perméabilité du sol désigne sa capacité à permettre à l'eau de pénétrer dans les couches inférieures ; elle varie en fonction de la texture et de la structure du sol

4.2.3.2. Propriétés chimiques :

A. Le pH : Le pH du sol est une mesure de son acidité ou de sa basicité, déterminée par la concentration d'ions d'hydrogène (H^+) dans le sol. Les valeurs de pH rencontrées pour les sols vont de 4,5 à 8,5.

Le pH du sol influence la disponibilité des nutriments pour les plantes. Certains éléments essentiels comme l'azote, le phosphore et le potassium sont mieux disponibles dans des plages de pH spécifiques. Par exemple, un pH légèrement acide à neutre est souvent optimal pour la plupart des plantes, car il favorise l'absorption des nutriments essentiels.

B. La capacité d'échange cationique (CEC) : La Capacité d'Échange Cationique (CEC) est une propriété chimique fondamentale du sol. Elle mesure la quantité totale de cations (ions positifs) que le sol peut retenir sur ses particules et échanger avec la solution du sol (l'eau contenue entre les particules). Les cations principaux incluent le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), le sodium (Na^+), ainsi que des ions hydrogène (H^+) et aluminium (Al^{3+}).

La valeur de la CEC dépend principalement de deux constituants du sol :

- ✓ La matière organique (notamment l'humus) : Possède une CEC très élevée en raison de sa grande surface et de ses nombreux sites chargés négativement.
- ✓ Les argiles : Leur structure en feuillets leur confère également une CEC élevée, bien que variable selon le type d'argile (ex : montmorillonite > kaolinite).

La mesure de la CEC est importante pour comprendre la capacité d'un sol à fournir des nutriments aux plantes et à maintenir sa fertilité (**Fig.4.6**).

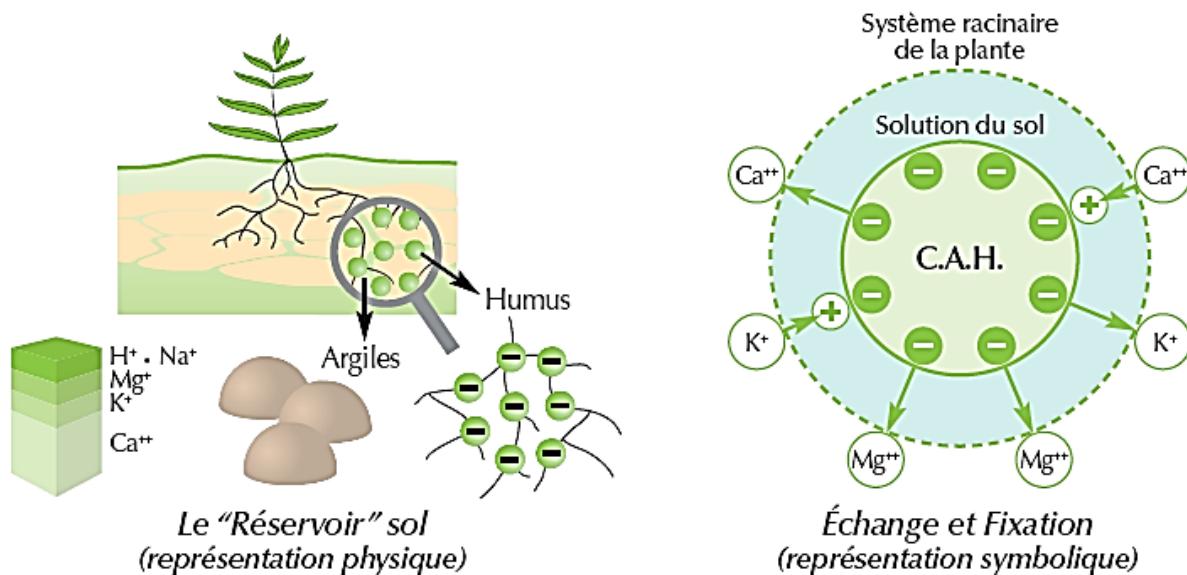


Figure 4.6 : Capacité d'échange cationique du sol.

Note : L'humus est une substance sombre et riche en éléments nutritifs qui améliore la structure du sol, sa rétention d'eau et sa capacité à fournir des nutriments aux plantes.

4.2.4. Importance et fonctions du sol :

Bien que d'une épaisseur infime à l'échelle de la terre, le sol est une enveloppe indispensable : il constitue l'espace vital et le fondement de l'existence pour les humains, les animaux, les plantes et les microorganismes. Cette couche fragile est donc un bien commun qui exige une protection absolue.

Le sol remplit, dans le cycle naturel, des fonctions vitales et multiples :

- Il est le support de la vie végétale et fournit les substances nutritives (organiques et minérales) essentielles. Le sol perd continuellement une partie de ces substances nutritives à travers les plantes, mais aussi par émission de gaz, par le lessivage avec l'eau, l'effritement ou l'érosion (**Fig. 4.7**). Ces pertes sont compensées par la minéralisation provenant des substances organiques mortes, par l'érosion des roches et par les apports de l'atmosphère (par exemple la fixation de l'azote). De plus les substances nutritives qui sont enlevées lors des récoltes souvent remplacées par les engrains.
- Il régule le cycle de l'eau : en contrôlant l'infiltration et l'écoulement des précipitations, il alimente les nappes phréatiques et influence l'évaporation vers l'atmosphère.
- Il agit comme un filtre et un épurateur naturel : il retient et dégrade biologiquement les substances organiques et les polluants, contribuant à la purification de l'eau qui rejoint les nappes souterraines.
- Il est un habitat et une base nutritive pour une immense biodiversité (microorganismes, faune), qui assure la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments.
- Il sert de support à nos activités : il est le fondement de la production alimentaire et de la culture des matières premières renouvelables.
- Il joue un rôle crucial de tampon et de transformation face aux polluants issus de l'agriculture, de l'industrie, des transports et de l'habitat (**Fig. 4.8**).

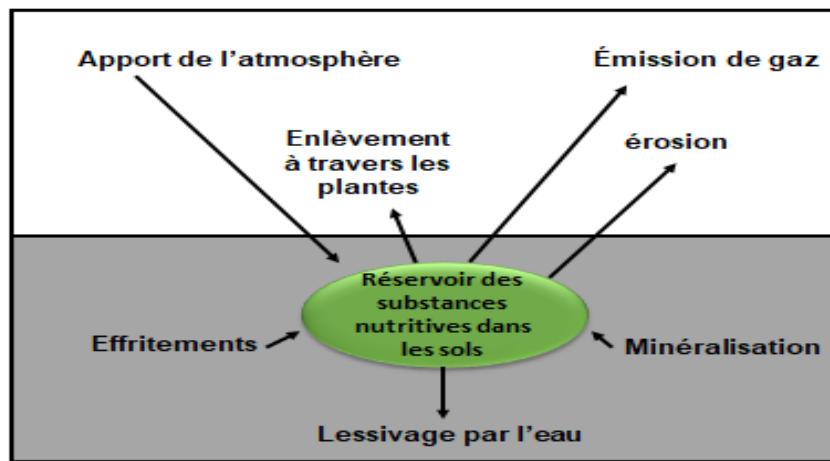


Figure 4.7 : Influence du stockage des substances nutritives dans le sol.

Trois groupes de polluants sont particulièrement nuisibles pour le sol :

- Des sources d'acide comme SO_2 ou NO_x : ils réduisent la capacité tampon des sols et accélèrent ainsi leur acidification ;
- Les métaux lourds : ils ne sont pas dégradables et se concentrent dans les sols ;
- De nombreux produits chimiques organiques, particulièrement ceux contenant du chlore : ils ne sont que très lentement dégradés.

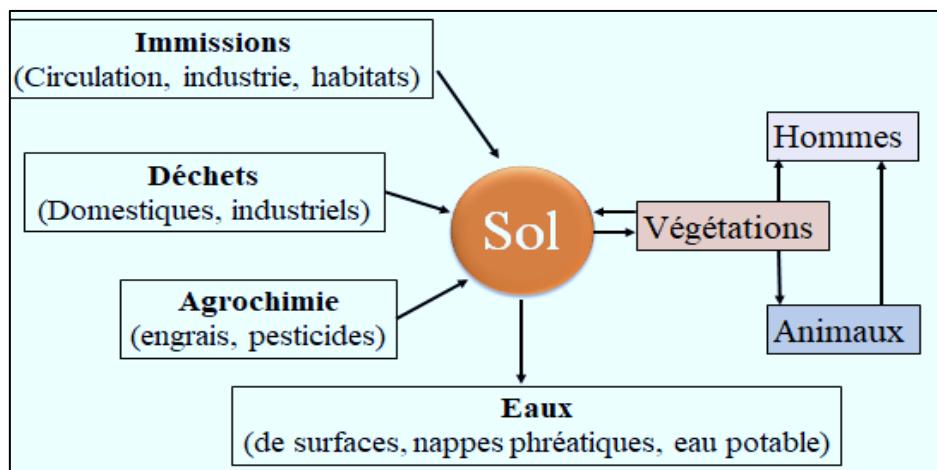


Figure 4.8 : Le sol en tant que réservoir, tampon et transformateur des polluants.

4.2.5. Pollution du sol :

La pollution des sols désigne l'altération des propriétés naturelles du sol par des substances chimiques, des déchets ou d'autres matériaux dangereux. Ces substances sont souvent le résultat d'activités humaines, comme l'industrie, l'agriculture ou l'urbanisation. Elles affectent la qualité du sol. Les polluants proviennent de sources diverses, notamment des déchets industriels, des produits phytosanitaires utilisés en agriculture, des métaux lourds,

ainsi que des produits chimiques libérés accidentellement ou intentionnellement dans l'environnement.

On dit qu'un sol est pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour la santé, des plantes ou des animaux.

La contamination se fait alors soit par voie digestive (consommation d'eau polluée par exemple), ou par voie respiratoire (poussières des sols pollués dans l'atmosphère).

4.2.5.1. Formes de pollution des sols :

En fonction de leur origine et de leur étendue spatiale, les pollutions du sol peuvent être classées en deux grandes catégories :

A. Pollutions diffuses : Ces pollutions se caractérisent par une dissémination sur de vastes surfaces, avec des concentrations généralement faibles mais continues. Elles résultent principalement de :

- L'utilisation agricole d'intrants (engrais, pesticides, lisiers) par épandage.
- Les retombées atmosphériques de polluants issus d'activités urbaines, industrielles ou du trafic routier.

Les pollutions diffuses par les pesticides sont particulièrement suivies en raison de leur impact sur les écosystèmes et la santé. La dispersion et l'accumulation lente de ces substances conduisent à une contamination homogène sur de grandes étendues, ce qui correspond à la notion de « sites uniformément contaminés » (norme NF ISO 11074-1, 1997).

B. Pollutions ponctuelles ou accidentelles : À l'inverse, ces pollutions sont localisées dans l'espace et dans le temps, souvent liées à un événement précis. Elles se manifestent par une forte concentration de substances dangereuses sur une surface restreinte. Leur origine est généralement :

- Un déversement ou une fuite accidentelle (ex. : hydrocarbures, produits chimiques).
- Un dépôt localisé de déchets (ancienne décharge, site industriel).

Ces situations génèrent des « sites localement contaminés » (norme NF ISO 11074-1, 1997), où la pollution est concentrée en un point précis du sol et du sous-sol.

4.2.5.2. Sources de pollution du sol :

A. Sources naturelles :

Plusieurs phénomènes naturels contribuent à la modification ou à la contamination de la composition des sols (**Fig. 4.9**):



Figure 4.9 : Sources naturelles de la pollution du sol.

- ✓ Le volcanisme ;
- ✓ La chute des météorites ;
- ✓ L'altération de la roche mère ;
- ✓ Les pluies acides ;
- ✓ Les incendies de forêts ;
- ✓ Érosion.

Ces sources sont généralement peu fréquentes et leurs impacts restent le plus souvent localisés. Il existe néanmoins des cas de sols naturellement concentrés en éléments polluants, par exemple en métaux lourds ou en hydrocarbures.

B. Sources anthropiques :

Les activités humaines constituent la principale cause de pollution des sols, avec des conséquences souvent plus graves et étendues. Cette pollution peut être **directe** (dépôt de substances sur ou dans le sol) ou **indirecte** (contamination via l'air ou l'eau).

Principaux vecteurs de pollution anthropique :

- ✓ Déversements ou fuites accidentels (hydrocarbures, produits chimiques) ;
- ✓ Infiltration de lixiviats provenant de décharges ou de sites de stockage de déchets ;
- ✓ Epandage excessif de produits agricoles (pesticides, herbicides, engrains) ;
- ✓ Décharges sauvages ou non contrôlées de déchets ménagers et industriels ;
- ✓ Percolation d'eaux souterraines ou de surface déjà contaminées ;
- ✓ Rupture de réservoirs de stockage enterrés (carburant, produits chimiques).

Cette pollution est particulièrement préoccupante car elle introduit dans l'environnement des quantités massives de substances, qu'il s'agisse :

- De produits biodégradables en quantités excédant la capacité d'auto-épuration du sol ;
- De composés synthétiques à longue durée de vie (demi-vie élevée) ;
- De produits persistants et non biodégradables (ex. : certains plastiques, métaux lourds) (Fig.4.10).

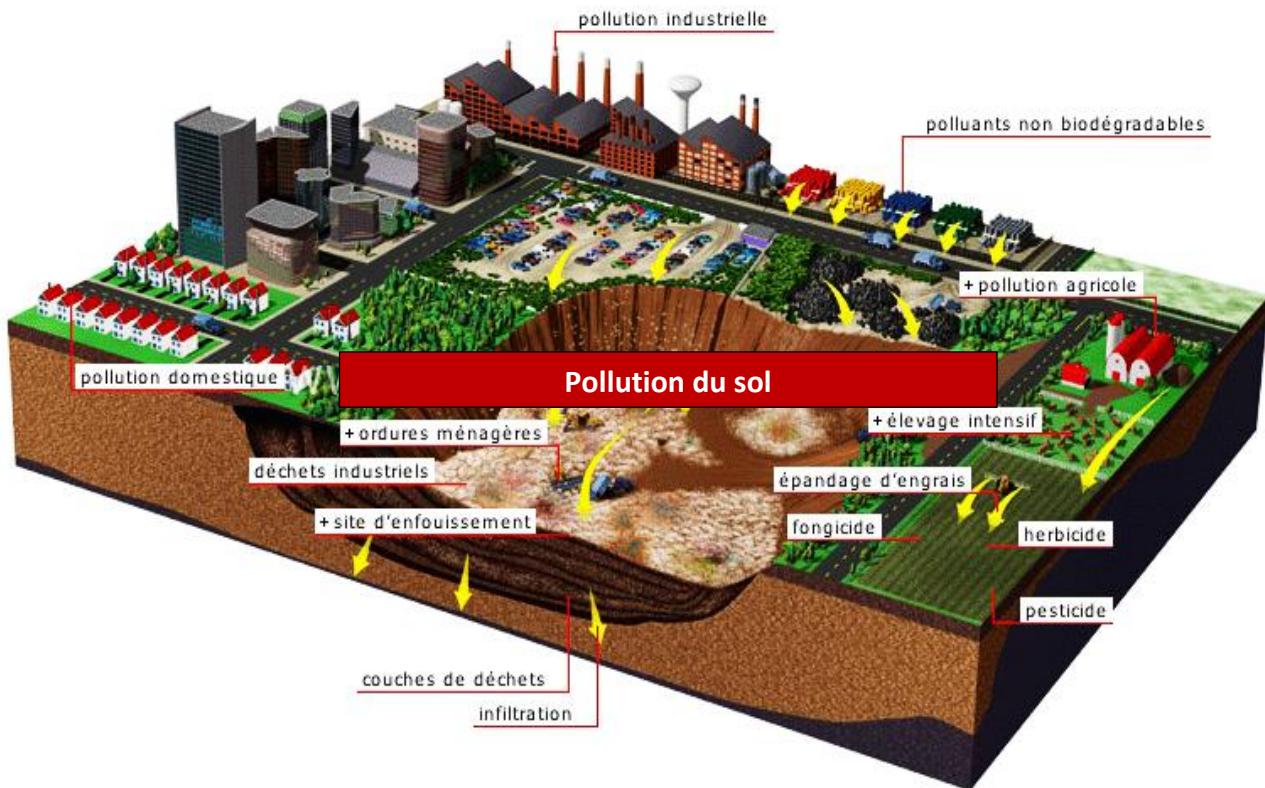


Figure 4.10 : Sources anthropiques de la pollution du sol.

4.2.5.3. Polluants présentent dans le sol :

Les polluants du sol les plus courants sont :

A. Polluants inorganiques (ou minéraux):

A.1. Métaux lourds et métalloïdes : Arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), mercure (Hg), nickel (Ni), plomb (Pb), zinc (Zn). Ils sont persistants, s'accumulent dans la chaîne alimentaire et sont souvent issus de l'industrie, des mines ou de certains produits agricoles.

A.2. Sels solubles : Chlorures, nitrates, sulfates. Une salinisation excessive (par irrigation ou remontée capillaire) nuit à la fertilité et à la structure du sol.

A.3. Nutriments en excès : Principalement les nitrates (NO_3^-) et les phosphates (PO_4^{3-}). Provenant des engrais et des effluents d'élevage, ils peuvent contaminer les eaux et déséquilibrer les écosystèmes (eutrophisation).

A.4. Acides : Issus des pluies acides ou de rejets industriels, ils modifient le pH et libèrent des éléments toxiques

B. Polluants organiques :

B.1. Hydrocarbures pétroliers : Essence, diesel, huiles, goudrons (famille des HAP - Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques). Provenant des fuites de réservoirs, accidents industriels ou activités minières.

B.2. Solvants chlorés : Utilisés dans les dégraissants, nettoyage à sec (ex. : trichloréthylène, perchloroéthylène). Très mobiles et persistants dans les sols et les nappes.

B.3. Pesticides : Herbicides, insecticides, fongicides. Certains sont rémanents (ex. : DDT, atrazine, lindane) et peuvent être toxiques pour la faune du sol et les organismes non-cibles.

B.4. PCB (Polychlorobiphényles) et dioxines : Composés organiques chlorés très stables, utilisés autrefois dans les transformateurs électriques ou formés lors de combustions. Très toxiques et bioaccumulables.

B.5. Polluants organiques émergents : Résidus pharmaceutiques, hormones, produits de soins personnels, plastifiants (phtalates, bisphénols). Leur impact à long terme est encore mal connu.

C. Polluants physiques et autres :

C.1. Déchets solides : Plastiques, verre, métaux, gravats. Ils modifient la structure du sol et gênent son fonctionnement.

C.2. Polluants biologiques : Agents pathogènes (bactéries, virus, parasites) issus des déjections animales, des eaux usées ou des déchets mal compostés.

C.3. Substances radioactives : Césium-137, strontium-90, uranium, provenant d'accidents nucléaires, d'activités minières ou de déchets.

4.2.5.3. Effets de la pollution du sol :

A. Effets de la pollution des sols sur la santé humaine :

La pollution des sols constitue une menace insidieuse et majeure pour la santé publique. Les substances toxiques accumulées dans les sols ne s'y limitent pas ; elles

s'introduisent dans la chaîne alimentaire et l'environnement, exposant les populations à des risques graves et variés.

Les principaux mécanismes d'impact sur la santé sont les suivants :

- **Contamination de la chaîne alimentaire** : Les cultures absorbent les polluants (métaux lourds, hydrocarbures, produits chimiques persistants) présents dans le sol où elles poussent. La consommation régulière de ces aliments contaminés entraîne une bioaccumulation de toxines dans l'organisme humain. Cette exposition chronique est identifiée comme un facteur de risque contributif dans l'augmentation de l'incidence de certains cancers et de diverses maladies chroniques.
- **Altérations génétiques et maladies congénitales** : L'exposition prolongée à un mélange de polluants, notamment via l'eau ou les poussières contaminées, peut exercer des effets mutagènes ou tératogènes. Cela signifie qu'elle est susceptible d'affecter l'intégrité du matériel génétique, augmentant les risques de maladies congénitales et de troubles du développement chez les nouveau-nés.
- **Risques indirects et intoxication alimentaire** : Le bétail paissant sur des terres polluées ingère à son tour des substances nocives, qui se concentrent dans la viande, le lait ou les œufs. Cette voie constitue un vecteur d'exposition secondaire important pour l'homme. Par ailleurs, des agents pathogènes ou des toxines biologiques peuvent persister dans des sols dégradés, représentant un risque d'intoxication alimentaire sur le long terme.

B. Effets de la pollution des sols sur la croissance des plantes:

La pollution du sol perturbe profondément les conditions nécessaires à la croissance des plantes et à l'équilibre écologique, entraînant une cascade d'effets négatifs.

Altération des Conditions de Croissance et de la Santé des plantes : La modification radicale et rapide de la composition chimique du sol dépasse les capacités d'adaptation de la plupart des végétaux. Cette perturbation se manifeste par :

- **Baisse de fertilité et de productivité** : Les sols contaminés voient leur rendement agricole diminuer. Les cultures qui y parviennent à pousser produisent souvent des fruits et légumes carentiels en nutriments essentiels et, plus grave, porteurs de substances toxiques (métaux lourds, résidus de pesticides), posant un risque direct pour la santé des consommateurs.
- **Dégénération de la structure physique** : La pollution affecte les organismes du sol, tels que les vers de terre, dont l'activité est cruciale pour l'aération, le drainage et la

structuration de la terre. Leur disparition entraîne un compactage du sol et une diminution de sa capacité à retenir l'eau et les nutriments.

C. Les conséquences économiques de la pollution des sols :

La pollution des sols dissémine ses répercussions financières, et le contrecoup économique prend différents aspects.

- **La dévaluation foncière** : la valeur des terres polluées chute et rend difficile leur vente ou leur utilisation à des fins industrielles ou résidentielles. Propriétaires fonciers, mais aussi collectivités locales, accusent une perte de leurs revenus issus de leur activité.
- **Les coûts de dépollution** : la réhabilitation des sites soumis aux pollutions nécessite des investissements lourds. Le nettoyage des terres demande des technologies sophistiquées, notamment le retrait des substances toxiques et la réhabilitation écologique des sols.
- **La baisse de productivité** : la piètre qualité des sols réduit les récoltes. Les sites aux fortes pollutions peuvent même ne plus être cultivables. Les agriculteurs accusent des pertes financières. L'importation de produits alimentaires pourrait pallier le manque, mais elle augmente les prix pour les consommateurs.
- **Les coûts de santé publique** : le traitement des maladies causées par la contamination de sols dès lors pollués, impose une charge sur les systèmes de santé. Les gouvernements doivent investir dans des campagnes de dépistage, des soins de santé pour les populations affectées, et des mesures de prévention contre les pollutions diverses.

4.2.5.4. Lutter contre la pollution des sols : des actions à tous les niveaux

La pollution des sols n'est pas une fatalité. Des solutions existent pour la prévenir et y remédier, grâce à l'action collective et individuelle.

A. Prévenir la contamination

- **Gestion durable des déchets** : Il est crucial d'améliorer le traitement des déchets domestiques, industriels et chimiques. Les déchets électroniques doivent être recyclés via des technologies modernes (filtration, valorisation énergétique de la biomasse) plutôt qu'exportés vers des décharges sauvages.
- **Agriculture plus verte** : Réduire l'usage des pesticides de synthèse en favorisant l'agriculture biologique et les pesticides naturels, comme le prévoit la stratégie Écophyto 2030, préserve la santé des sols.

- **Cadre réglementaire strict** : Le renforcement des lois pour limiter les rejets industriels et l'application rigoureuse du principe pollueur-payeur sont essentiels. Les entreprises doivent être responsables de la prévention et de la dépollution.

B. Remédier et surveiller

- **Réhabiliter les sites pollués** : Après une évaluation précise de la contamination, des techniques comme la bioremédiation (utilisation de plantes ou de microbes) permettent de purifier les sols.
- **Surveillance et transparence** : Des outils comme le Secteur d'Information sur les Sols (SIS) en France centralisent les données pour une surveillance efficace. La réglementation des installations classées (ICPE) permet de gérer les risques.
- **Sensibilisation citoyenne** : Informer le public sur les impacts des polluants et promouvoir des gestes simples (tri, recyclage, sobriété) encourage des comportements responsables.

4.2.5.5. Les techniques de dépollution du sol :

Les techniques de dépollution du sol désignent l'ensemble des procédés visant à purifier ou à isoler un milieu affecté par une pollution durable, dans le but de le rendre à nouveau utilisable à des fins agricoles, industrielles ou de le réhabiliter en milieu naturel. Le choix de la technique employée dépend à la fois de la nature des polluants et du niveau de contamination.

A. Décontamination par lavage :

La technique de lavage des sols est applicable aux sols contenant plus de 30 % d'argile et de limons. Le processus consiste d'abord à excaver le sol pollué, puis à séparer mécaniquement les particules par tamisage. Les contaminants sont ensuite éliminés par un lavage abrasif avec de l'eau et des additifs (comme des surfactants), qui les transfèrent vers une phase liquide pour concentration et élimination. L'efficacité de cette méthode dépend principalement de la granulométrie du sol, de la force d'adsorption des polluants et de leur répartition dans les différentes fractions de particules.

B. Solidification et stabilisation :

Cette méthode, couramment employée pour les sols contaminés par des métaux, consiste à immobiliser les polluants en les incorporant dans une matrice solide. On utilise pour cela des liants minéraux comme le ciment, la chaux, des aluminosilicates ou des phosphates, qui solidifient le sol et réduisent la solubilité et la mobilité des contaminants. Les

polluants, notamment les métaux lourds non biodégradables, ne sont pas détruits, mais leur impact environnemental est considérablement limité.

C. Vitrification :

La vitrification est un procédé thermique appliqué *in situ*. Grâce à des électrodes enfoncées dans le sol, celui-ci est porté à une température très élevée (environ 2000°C). Il se transforme alors en un matériau fondu qui, en refroidissant, se solidifie en un bloc de verre stable et chimiquement inerte, encapsulant définitivement les contaminants et réduisant considérablement tout risque de lixiviation. Les polluants organiques sont, quant à eux, volatilisés par la chaleur, puis captés et traités sous forme gazeuse.

D. Biodégradation aérobie :

Ce procédé utilise les micro-organismes naturellement présents dans le sol pour dégrader les polluants organiques. En présence d'oxygène, ces bactéries et champignons utilisent les contaminants comme source de nourriture, les transformant en dioxyde de carbone, en eau et en biomasse nouvelle. L'efficacité de cette dégradation complète dépend de plusieurs facteurs : une teneur suffisante en oxygène, un pH proche de la neutralité, une température adéquate et un taux d'humidité équilibré. Cette méthode est plus efficace et aboutit à une élimination plus totale des polluants que les processus anaérobies (sans oxygène).

E. Traitement de confinement :

Cette technique a pour objectif d'isoler les terres et les eaux polluées directement sur site, afin d'empêcher la propagation des contaminants vers les couches de sol saines ou les milieux environnants. Elle ne procède pas à l'élimination des polluants, mais vise à supprimer le risque de contamination par la mise en place de barrières étanches (physiques ou géochimiques) entre la source de pollution et l'environnement à protéger.

F. Phytoremédiation :

La phytoremédiation est une technique qui utilise des plantes pour dépolluer les sols, que ce soit des contaminants organiques ou inorganiques (comme les métaux lourds). Elle repose sur trois mécanismes principaux (**Fig.4.11**):

- **La phytoextraction :** Des plantes spécialisées absorbent et concentrent les polluants dans leurs parties aériennes, qui sont ensuite récoltées.

- **La phytostabilisation** : Des plantes permettent d'immobiliser les polluants dans le sol, réduisant ainsi leur dispersion et leur toxicité.
- **La rhizodégradation** : Les plantes stimulent, via leurs racines, l'activité des micro-organismes du sol qui dégradent alors les polluants organiques.
- **La phytovolatilisation** utilise des plantes à forte évapotranspiration pour absorber les polluants et les relâcher dans l'atmosphère sous une forme diluée et généralement inoffensive.
- **La phytodégradation** repose sur la capacité de certaines plantes à produire des enzymes qui dégradent les contaminants absorbés en substances non toxiques directement dans leurs tissus.
- **La phytomining** vise la récupération économique des métaux : les plantes accumulatrices sont récoltées et traitées en usine pour extraire et valoriser les métaux contenus dans leur biomasse.

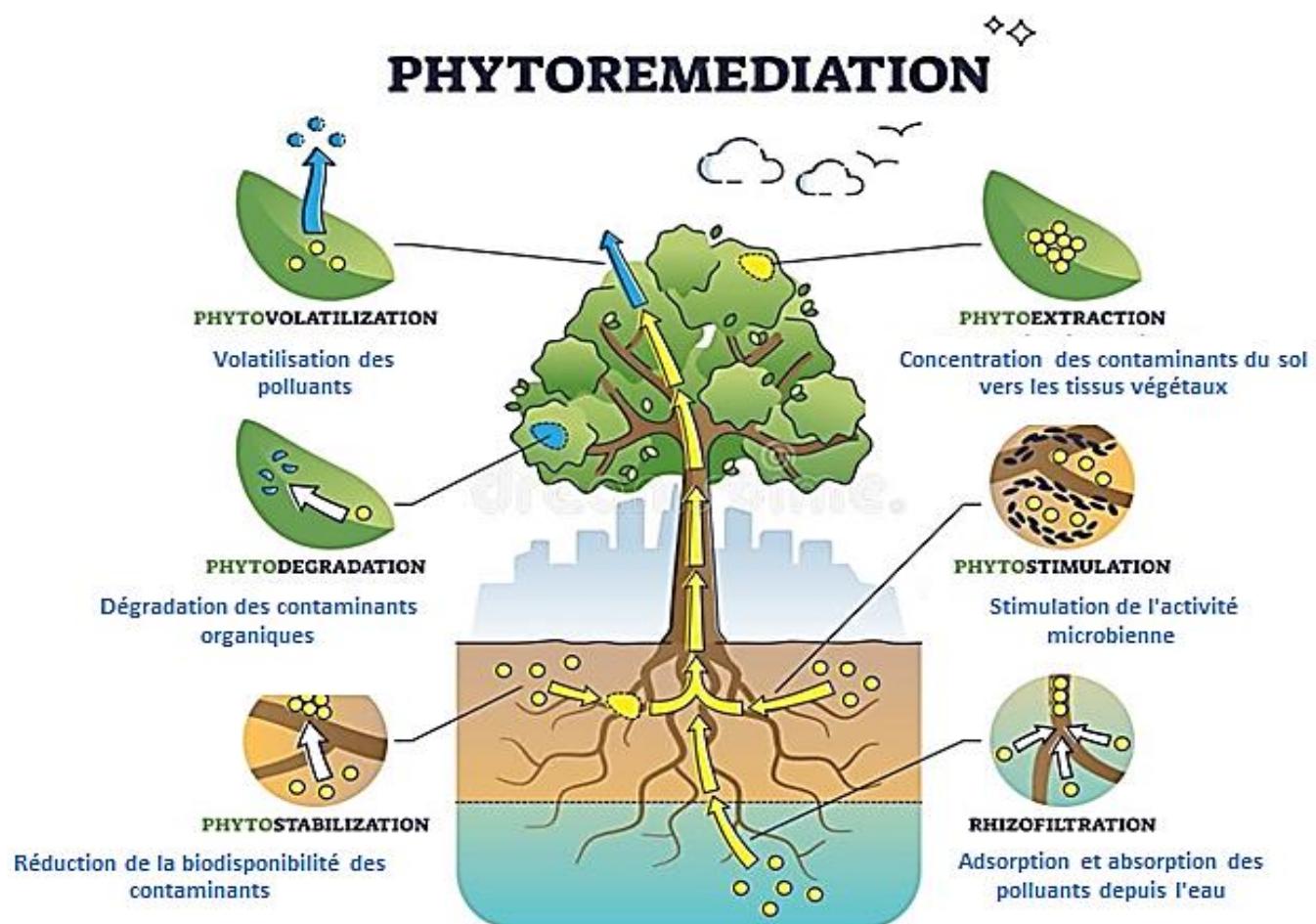


Figure 4.11 : Schéma synthétisant les différentes formes de phytoremédiation.