

Sols et adaptation au changement climatique

De la compréhension des mécanismes aux pistes d'actions en contexte urbain

RAPPORT D'ÉTUDE

Janvier 2023

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport. Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Sols et adaptation au changement climatique

De la compréhension des mécanismes aux pistes d'actions en contexte urbain

Janvier 2023

Auteur.ices : Fabienne Marseille, Céline Hébrard Labit, Christelle Neaud, Catherine Neel, Mireille Perrot et Jean-Yves Leblain

Responsable du rapport :

Manon MARTIN – Département ADET – Groupe TE
Tél. : +33(0)4 72 74 59 19
Courrier : manon.martin@cerema.fr
Direction TV – Département ADET – Groupe TE – 2 rue Antoine Charial 69003 Lyon

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	01/02/19	Pour relecture GT
2	01/01/21	Mise à jour et relecture FM
3	01/07/21	Mise à jour
4	23/11/22	Relecture PB et MM

Références

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Fabienne Marseille	DTer CE / DTT	Contributeur		
Céline Hébrard Labit	DTer HF / DTEER	Contributeur		
Christelle Neaud	DTer IdF / DVD	Contributeur		
Catherine Neel	DTer CE / ACF	Contributeur		
Mireille Perrot	DTer IdF / DIRM	Contributeur		
Jean-Yves Leblain	DTer O / AAn	Contributeur		
Manon Martin	DTec TV / DADET	Relecteur		
Philippe Branchu	DTer IdF / DVD	Relecteur		

Résumé de l'étude

Les sols jouent un rôle clef dans le fonctionnement des écosystèmes, de par les fonctions qu'ils assurent et les services qu'ils rendent. Ils apparaissent ainsi comme un élément central à prendre en compte dans l'aménagement des territoires. Pourtant, les sols, ressources non renouvelables à l'échelle humaine, sont soumis à de nombreuses pressions (urbanisation, imperméabilisation, tassement, érosion, pollution, ...) qui dégradent leurs fonctions voire les suppriment, situation amplifiée par le changement climatique.

Leur préservation apparaît ainsi comme un enjeu fondamental dans l'adaptation au changement climatique. Des leviers d'actions, à différentes échelles de mise en œuvre, existent aujourd'hui afin de limiter l'artificialisation des sols et favoriser des actions de désimperméabilisation et renaissance des sols afin de leur permettre de retrouver leurs fonctions.

Le rapport réalisé s'adresse aux acteurs de la gestion des sols en milieu urbain et périurbain pour leur apporter connaissances, conseils et appuis méthodologiques pour la mise en œuvre d'actions concrètes sur leurs territoires. Des exemples de bonnes pratiques font l'objet de fiches pédagogiques et montrent qu'un certain nombre d'actions sont déjà mises en œuvre sur le territoire national.

Ce travail vise à renforcer la prise de conscience de l'importance de la préservation des sols, notamment au niveau des politiques de planification et d'aménagement opérationnel. Cette mutation implique une collaboration étroite entre les aménageurs et les scientifiques afin de bâtir une stratégie d'aménagement de nos territoires de vie qui, dans tous les cas, ne pourra se faire sans préserver et tenir compte des sols urbains et péri-urbains.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Sols	Compréhension des mécanismes
Sols urbains et péri-urbains	Fonctionnalité des sols
Adaptation au changement climatique	Impacts
Aménagement	Leviers d'action

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- Accès libre : document accessible au public sur internet
- Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

SOMMAIRE

1 LES SOLS.....	11
1.1 Qu'est-ce qu'un sol ?.....	11
1.1.1 Une lente genèse.....	11
1.1.2 Les sols sont uniques et diversifiés.....	11
1.2 Fonctions exercées et services rendus par le sols.....	12
1.2.1 De quoi parle-t-on ?.....	12
1.2.2 Comment évaluer la qualité du sol ?.....	13
2 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	14
2.1 Nombreux changements observés et projections.....	14
2.1.1 Les constats à l'échelle mondiale.....	14
2.1.2 Les scénarios de changement retenus à l'échelle globale.....	15
2.1.3 La déclinaison des scénarios climatiques projetés pour la France.....	15
2.1.4 Le bilan des effets déjà observés en France.....	16
2.2 Les conséquences attendues pour la fin du XXIème siècle.....	16
2.2.1 Un accroissement des incendies et inondations.....	16
2.2.2 Les processus naturels directement affectés dans les sols.....	17
2.2.3 Des effets imbriqués à anticiper.....	18
3 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FONCTIONS DU SOL.....	18
3.1 La fonction régulation du cycle de carbone.....	19
3.1.1 Le sol : réservoir naturel de carbone.....	19
3.1.2 Stockage du carbone : équilibre entre minéralisation et humification.....	19
3.1.3 Cartographie des stocks de carbone dans les sols en France.....	20
3.1.4 Rôle déterminant de l'homme : occupation des sols et pratiques agricoles.....	21
3.2 Les fonctions d'infiltration, stockage et réserve d'eau (rétention, infiltration, évapo-transpiration).....	22
3.2.1 Le sol : régulation des flux d'eau.....	22
3.2.2 Implication de la teneur en matière organique du sol sur le stockage de l'eau.....	23
3.2.3 Effet des activités anthropiques sur la réserve en eau utile par les plantes et la capacité d'infiltration des sols.....	24
3.2.4 Impacts du réchauffement climatique sur l'infiltration de l'eau et risques associés. . .	24
3.3 La fonction de production végétale.....	25
3.3.1 Le sol : support de végétation.....	25

3.3.2	L'altération par érosion du sol non couvert et impact des activités anthropiques.....	26
3.3.3	Effets irréversibles induits par des sécheresses récurrentes.....	26
3.4	La fonction réservoir de biodiversité.....	27
3.4.1	Les organismes du sol.....	27
3.4.2	Les rétro-actions du système climat-biodiversité.....	28
3.4.3	Mécanismes d'adaptation au changement climatique de la biodiversité.....	28
3.4.4	Incertitudes sur les relations climat-biodiversité des sols.....	29
3.4.5	Implication sur le « bio-réacteur sol » et sa capacité d'épuration.....	30
3.5	La fonction support des infrastructures et aménagements.....	30
3.5.1	Impact sur la stabilité des cavités souterraines.....	30
3.5.2	Dissolution du gypse.....	31
3.5.3	Sécheresse géotechnique – Retrait-gonflement des argiles.....	32
3.6	Menaces et leviers d'action.....	32
3.6.1	Le sol, un milieu essentiel et pourtant menacé.....	32
3.6.2	Leviers d'actions pour s'adapter au changement climatique.....	33
4	LES SOLS EN MILIEU URBAIN COMME LEVIER D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	34
4.1	Spécificités des zones urbaines et péri-urbaines.....	34
4.1.1	Singularité des sols urbains.....	34
4.1.2	Services écosystémiques des sols : un levier d'actions face au changement climatique.....	34
4.2	Ville et changement climatique.....	35
4.2.1	Le changement climatique en milieu urbain.....	35
4.2.2	Les politiques urbaines d'adaptation.....	36
4.2.3	Les documents de planification comme outils d'action.....	37
4.3	Des exemples d'actions en milieu urbain et péri-urbain.....	38
4.3.1	A l'échelle de la planification.....	40
4.3.2	A l'échelle de la commune.....	41
4.3.3	A l'échelle du projet d'aménagement.....	41

Table des illustrations

Illustration 1: variabilité des sols (Crédit photo : Joël Moulin – Chambre d’Agriculture de l’Indre)	12
Illustration 2: fonctions agronomiques et hydrogéologiques du sol, services rendus et enjeux associés.....	13
Illustration 3: fonctions physiques et mécaniques du sol, services rendus et enjeux associés.....	13
Illustration 4: fonctions sociales et économiques du sol, services rendus et enjeux associés.....	14
Illustration 5: fonctions environnementales du sol, services rendus et enjeux associés.....	14
Illustration 6: évolution des températures en France métropolitaine passée (1976-2005) pour différents horizons à venir (échelle d’évolution des températures pour l’ensemble des projections : - 2° à +6°); ceci pour plusieurs scénarios établis par le GIEC – Source : DRIAS.....	18
Illustration 7: évolution des précipitations en France métropolitaine passée (1976-2005) et pour différents horizons à venir; ceci pour plusieurs scénarios établis par le GIEC – Source : DRIAS.	19
Illustration 8: Changements observés depuis 1950 et projetés pour les principales zones climatiques européennes (d’après le rapport : Climat change, impacts and vulnerability in Europe, 2016).....	20
Illustration 9: Lien entre la variation de la température moyenne à la surface du globe par rapport aux niveaux pré-industriels (°C) et les systèmes menacés- Degré de confiance pour la transition: F = faible, M = moyen, É = élevé – source : GIEC, 2019.....	21
Illustration 10: Impacts combinés du changement climatique et de l’usage des sols (adapté du rapport de l’European Environment Agency, 2017).....	22
Illustration 11: Exemple de suite d’effets irréversibles induits par une dégradation du sol - D’après (Lal, 2012).....	22
Illustration 12: Exemples de boucles de rétro-actions à favoriser - D’après (Lal, 2012).....	23
Illustration 13: Transformation de la matière organique fraîche dans le sol.....	24
Illustration 14: Impact attendu du changement climatique sur la matière organique et l’activité biologique des sols, tiré et simplifié de l’article Sol et changement climatique par l’ « Agence Européenne de l’environnement » (EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe). Les bulles verte et rouge correspondent respectivement à un impact positif et négatif. ++ et - - correspondent à une augmentation ou diminution. MO : matière organique, CO : carbone organique.....	25
Illustration 15: Estimation des stocks de carbone organique dans les sols (0-30 cm de profondeur) en France métropolitaine hors Corse - Gis Sol, IGCS-RMQS, Inrae, 2017 , traitements : sdes 2019.....	26

Illustration 16: Variation des stocks de carbone organique selon l'affectation des sols en France (GIS sol).....	27
Illustration 17: Cartographie de la réserve utile en eau des sols de France métropolitaine - source site du GIS Sol (https://www.gissol.fr/).....	29
Illustration 18: Surfaces régionales artificialisées sur la période 2000-2006 réparties par réservoir en eau utile des sols – source SoeS, 2014.....	31
Illustration 19: évolution de la teneur en eau des sols en été sur la base d'observations passées (1961-1990) et de projections (2021-2050) Source : European Environmental agency 2017 https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/changes-in-summer-soil-moisture	32
Illustration 20: Cartographie de l'aléa érosion en France par petites régions agricoles - source : GIS Sol - INRAE - SOeS, 2011.....	34
Illustration 21: Surfaces affectées par les trois grandes périodes de sécheresse -2000, 2003, 2006- en Europe et leurs effets sur les écosystèmes végétaux - source : EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe.....	36
Illustration 22: Principales menaces sur les fonctions du sol. Source : Commission Européenne, 2006. Projet de directive cadre sur la protection des sols.....	43

Introduction

Les sols sont essentiels à la subsistance et au bien-être des êtres vivants. Ils sont à l'origine de nombreux services, tels que l'approvisionnement en nourriture et en eau douce, et jouent un rôle important dans les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau.

Dans un contexte de changement climatique le devenir de cette ressource indispensable interroge. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹ (GIEC) dans son rapport sur les terres émergées de 2019² indique que :

- 70 % des terres émergées libres de glace sont directement affectées par les activités humaines et que les populations utilisent un quart à un tiers de la production primaire nette potentielle des terres sous la forme de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux, de fibres, de bois ou d'énergie ;
- un quart de ces terres est dégradé par l'érosion, la désertification ou encore la pollution ;
- et 9 % est artificialisé (9,3 % en France en 2014³).

Les enjeux en matière de préservation des sols sont primordiaux pour maintenir ces services et en premier lieu la sécurité alimentaire, la séquestration du carbone, le stockage et la restitution de l'eau à la végétation, son transfert vers les nappes.

Dès lors, l'adaptation et la lutte contre le changement climatique et ses conséquences ne peuvent se faire sans préservation des sols. La prise en compte des différents enjeux liés aux sols est capitale dans un contexte de changement climatique avéré.

Avec 55 % de la population mondiale vivant en ville en 2019, 81 % en France⁴, le rôle des sols urbains, leur fonctionnement et les services spécifiques qu'ils remplissent sur ces territoires est également à analyser. Les zones urbaines (et périurbaines) sont à la fois des territoires vulnérables mais aussi des lieux d'action importants face aux impacts du changement climatique.

1 Le GIEC créé en 1988, réunit des scientifiques du monde entier dans le but de faire un état des connaissances sur le climat, son évolution et également d'identifier les causes et les impacts du changement climatique.

2 GIEC, 2019: Résumé à l'intention des décideurs, Changement climatique et terres émergées: rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (dir. publ.)].

3 Source du ministère en charge de l'agriculture (Teruti-Lucas) – Le taux d'artificialisation varie fortement en fonction de la source de donnée mais la tendance est identique. Expertise collective : Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, déterminants, impacts et leviers d'action. INRA 2017.

4 La population urbaine fait référence aux personnes vivant dans des aires urbaines telles que définies par les offices statistiques nationaux. Les résultats sont ensuite collectés et agrégés par la division population des nations unies. Source: Perspectives d'urbanisation du monde, Nations Unies.

Le présent rapport a pour objectif de :

- Réaliser une synthèse des connaissances sur les impacts du changement climatique sur les sols ;
- Identifier les principaux enjeux notamment pour les territoires (péri)urbains ;
- Proposer des leviers d'action permettant de réduire ces impacts et de s'y adapter.

La question des sols est abordée à travers leurs caractéristiques, leurs fonctions, les services qu'ils rendent et les menaces qui pèsent sur eux.

1 LES SOLS

1.1 Qu'est-ce qu'un sol ?

1.1.1 Une lente genèse

Les sols sont générés par l'interaction entre les formations géologiques, la biosphère et le climat. Leur formation dépend aussi de la topographie et du temps.

Le sol se forme sous l'effet de l'altération du substratum géologique soumis à des processus physico-chimiques et mécaniques liés à l'action du climat (température, humidité, etc.) et à l'activité biologique qui apportent de la matière organique issue de la dégradation de la biomasse (faune, flore). L'ensemble de ces facteurs qui constituent la pédogenèse vont conditionner les caractéristiques des sols.

Le sous-sol est le substratum à partir duquel se forme le sol. Ce substratum ou matériau parental se crée notamment à partir de dépôts sédimentaires, du volcanisme et du métamorphisme (transformation des roches dans des conditions particulières de pressions et de température). Les minéraux le constituant lui confère ses propriétés physico-chimiques. L'altération physique et chimique de ce substratum est un des éléments clefs de la pédogénèse.

La lenteur des processus de formation du sol, à l'échelle de centaines voire de milliers d'années, en fait une ressource non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine.

Le climat joue un rôle majeur dans les processus de formation mais également d'altération des sols ainsi que dans leurs caractéristiques à travers le lessivage, la mobilisation des argiles minérales, les mécanismes d'échange de nutriments. Le climat influe également sur le type et la quantité de végétation et donc sur la décomposition de la matière organique dans les sols.

1.1.2 Les sols sont uniques et diversifiés

Le sol est un milieu vivant d'une très grande richesse. Près de 360 000 espèces sont actuellement recensées mais les scientifiques estiment à environ 1 500 000 le nombre d'espèces présentes dans les sols. Des différents écosystèmes terrestres et aquatiques, le sol abrite la plus grande diversité d'organismes vivants depuis les micro-organismes (bactéries, champignons, algues, etc.) invisibles à l'œil nu jusqu'à la macrofaune (vers de terre, taupes, mulots, etc.). Cette biodiversité du sol assure son fonctionnement et celui des autres écosystèmes naturels.

Du point de vue physique, un sol est caractérisé par sa texture et sa structure (agrégats).

- La texture est définie par la proportion entre les différentes tailles de particules minérales qui composent le sol : sables (50-2000 μm), limons (2-50 μm) et argiles (<2 μm).
- La structure correspond à l'agencement entre les particules solides (minérales et organiques) permettant la formation d'agrégats.

La texture et la structure d'un sol vont influencer le volume des vides occupé par les constituants liquides et gazeux, appelé porosité. La texture génère les pores de petites tailles qui influencent la capacité du sol à infiltrer l'eau tandis que la structure génère les pores de plus grandes tailles qui

influencent la capacité du sol à retenir l'eau. Les organismes vivants (vers de terre, racines, ...) contribuent également à la création de cette porosité.

Il existe ainsi une très grande diversité de sols liée aux facteurs de la pédogénèse; au niveau européen, plus de 320 types de sols ont pu être identifiés, chacun disposant de caractéristiques et propriétés différentes. Ainsi, les sols ne remplissent pas les mêmes fonctions et ne sont donc pas « interchangeables ».

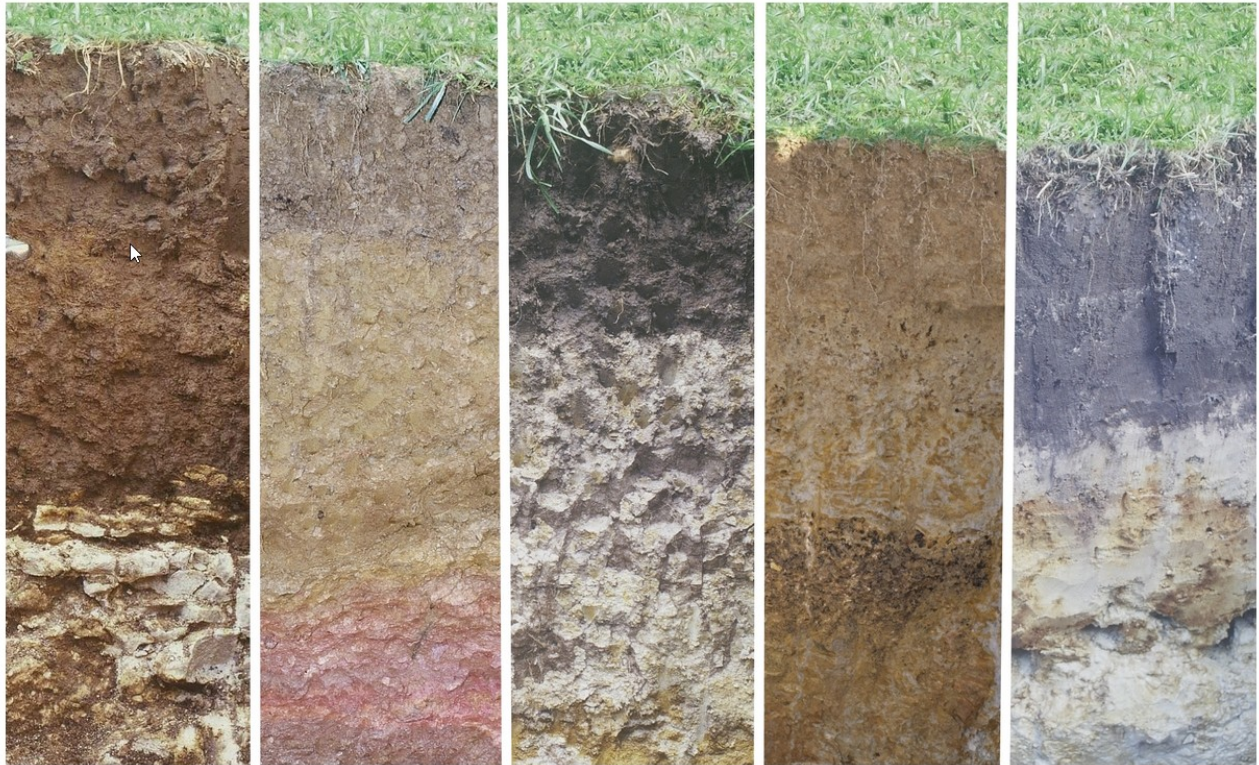


Illustration 1: variabilité des sols (Crédit photo : Joël Moulin – Chambre d'Agriculture de l'Indre)

1.2 Fonctions exercées et services rendus par le sols

1.2.1 De quoi parle-t-on ?

Un écosystème est un milieu délimité physiquement et constitué de deux composantes :

- un environnement physique particulier appelé biotope ayant des caractéristiques spécifiques (température, humidité, climat),
- et un ensemble d'êtres vivants en interaction, nommé biocénose.

Les êtres humains tirent un certain nombre de bénéfices du fonctionnement des écosystèmes (amélioration de la qualité de l'air, filtration de l'eau, dégradation de polluants, etc.). Parmi les différentes composantes de l'environnement, le sol demeure le moins familier.

Les fonctions qu'il assure et les services qu'il rend à l'homme sont nombreux et peuvent être regroupés comme suit :

- les fonctions agronomiques et hydriques (support de production végétale, régulation du cycle de l'eau),

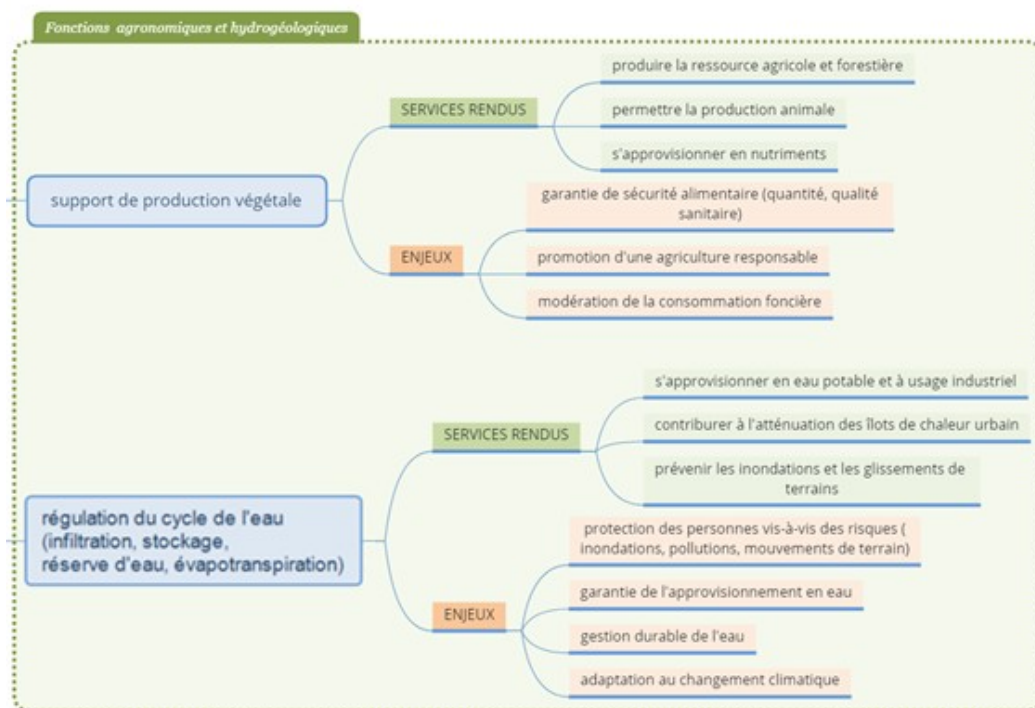


Illustration 2: fonctions agronomiques et hydrogéologiques du sol, services rendus et enjeux associés

- les fonctions physiques et mécaniques (source de matériaux, support des infrastructures et aménagements),

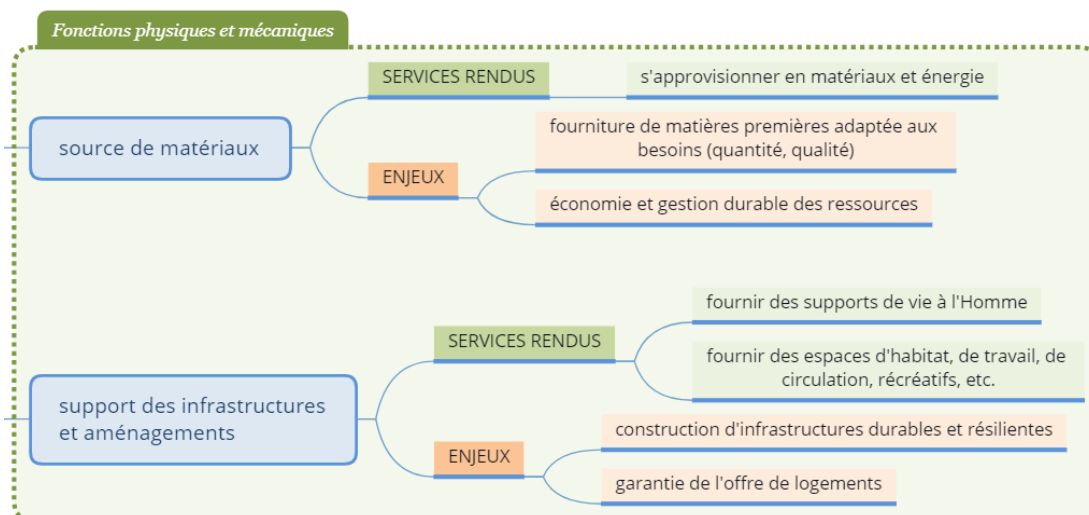


Illustration 3: fonctions physiques et mécaniques du sol, services rendus et enjeux associés

- les fonctions sociales et économiques (structuration du paysage, conservation du patrimoine géologique et archéologique, support de vie)

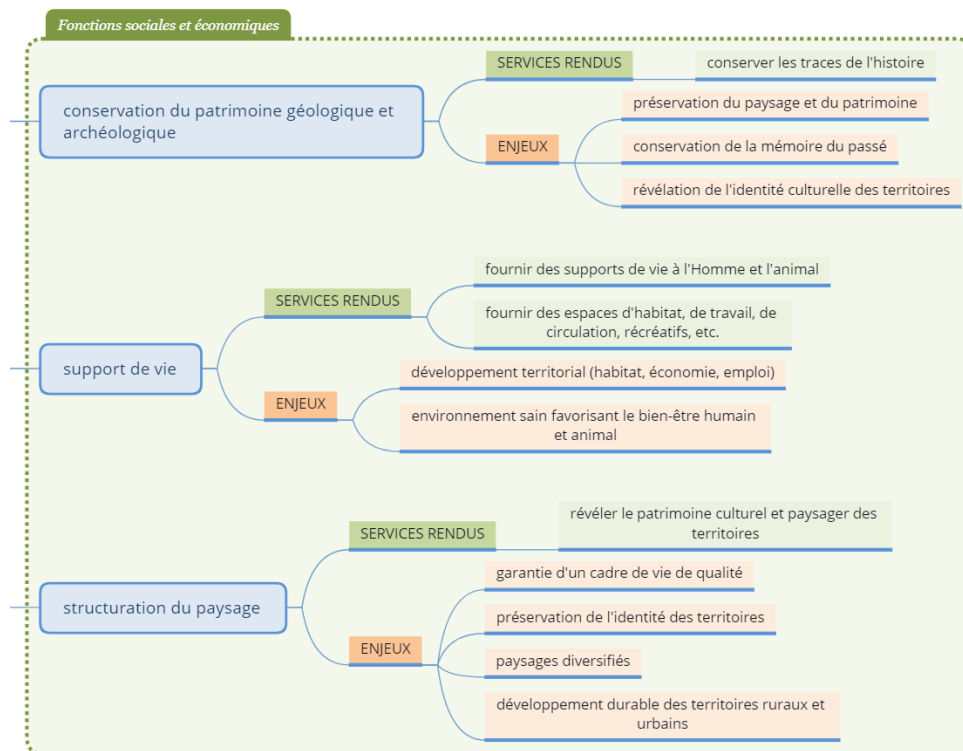


Illustration 4: fonctions sociales et économiques du sol, services rendus et enjeux associés

- les fonctions environnementales (biologiques et biogéochimiques : épuration et filtration des polluants, réservoir de biodiversité, régulation des flux de GES).

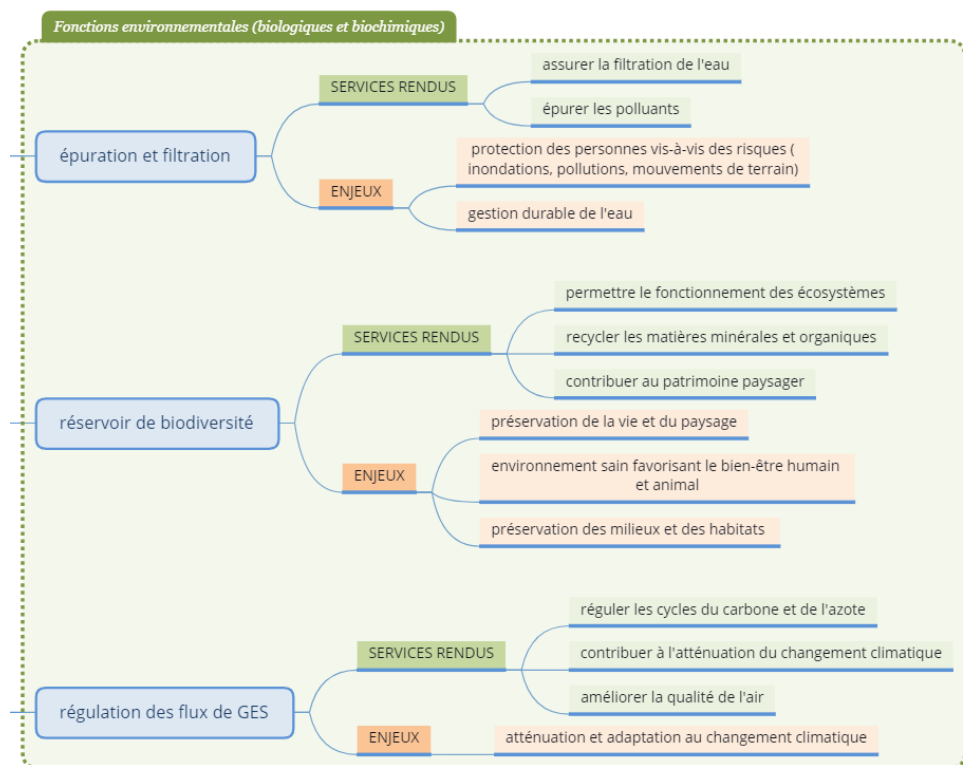


Illustration 5: fonctions environnementales du sol, services rendus et enjeux associés

A noter : d'autres regroupements de fonctions existent comme dans la définition de l'artificialisation de la loi « Climat et Résilience » de 2021⁵.

Les illustrations qui suivent montrent le lien entre les fonctions, services et enjeux liés aux sols qui peut être exprimé comme tel : les sols via les fonctions qu'ils exercent rendent des services à l'homme et à la société qui répondent à des enjeux de territoire.

Le sol est le support de l'activité humaine et notamment de la production agricole et forestière. Il est le lieu d'ancrage des systèmes racinaires des végétaux et constitue leur réservoir d'eau et d'éléments nutritifs. Il fournit ainsi les éléments indispensables à la production végétale pour nourrir les animaux et les hommes et produire les fibres, des matériaux et de l'énergie renouvelable.

Le sol régule, en outre, le régime des eaux superficielles et l'alimentation des eaux souterraines. Il détermine le partage entre ruissellement et infiltration des précipitations. Il joue un rôle de tampon vis-à-vis des écoulements hydrologiques permettant notamment d'amortir les phénomènes de crues.

Les éléments de nos paysages agricoles, forestiers et urbains prennent appui sur le sol. Il est le support du développement des infrastructures. Protection de notre patrimoine archéologique, le sol conserve la mémoire et l'empreinte des activités humaines au fil des temps.

À l'interface entre l'atmosphère et les aquifères, le sol filtre et/ou dégrade certains polluants et autres substances apportées par les activités humaines. Il abrite une biodiversité faunistique, floristique et microbienne remarquable par son abondance, dont une très grande partie est encore inconnue et représente donc un potentiel génétique et écologique considérable.

Enfin, le sol constitue un maillon central dans la régulation des grands cycles planétaires tels que ceux du carbone ou de l'azote, et assure ainsi des fonctions essentielles dans la régulation des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote).

1.2.2 Comment évaluer la qualité du sol ?

La qualité d'un sol et sa valeur, par rapport à sa localisation par exemple, peuvent donc être appréhendées au travers de ses fonctions, des services qu'il rend et de leur durabilité.

La préservation des sols est un enjeu majeur tant son rôle est central et tant les pressions sont fortes. L'évolution démographique, les activités agricoles, industrielles et touristiques, ainsi que le changement climatique peuvent dégrader les sols en modifiant leur fonctionnement. Des sols de bonne qualité permettent de répondre à de nombreux enjeux socio-économiques comme le développement des villes et des infrastructures, la gestion durable des espaces de vie, la production alimentaire ou énergétique, la garantie d'un approvisionnement en ressources saines, la préservation de la qualité de l'eau et la protection de la biodiversité, la protection contre les risques naturels, la lutte contre le changement climatique.

Face à ces enjeux, la connaissance et la prise en compte des fonctions et services rendus par les sols dans leur gestion apparaît alors essentielle.

Des indicateurs de qualité des sols peuvent être définis, caractérisant leur capacité à remplir différentes fonctions ou leur multi-fonctionnalité, que le décideur ou le gestionnaire pourront utiliser pour orienter leurs choix en matière d'usage ou de gestion des sols. On peut citer par exemple le

⁵ LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>)

potentiel agronomique comme indicateur de la fonction production de biomasse ou la sensibilité à l'infiltration comme indicateur de la fonction régulation du cycle de l'eau dans le projet MUSE⁶.

Ces indicateurs doivent permettre, notamment en milieu urbain, de mieux appréhender les mesures d'adaptation au changement climatique à prendre pour assurer la protection des sols et la gestion durable de leur usage.

2 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans son cinquième rapport « changement climatiques 2014 – rapport de synthèse⁷ », le GIEC affirme que « l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie ».

Le recours massif aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz), ainsi qu'une modification de l'utilisation des sols (déforestation, agriculture) ont conduit, depuis l'ère préindustrielle, à une augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux. Cette augmentation serait sans précédent depuis au moins 800 000 ans.

2.1 Nombreux changements observés et projections

2.1.1 Les constats à l'échelle mondiale

Avec une augmentation de la température du globe de 1,25°C, l'année 2020 se classe au premier rang des années les plus chaudes depuis 1850. En France métropolitaine, la hausse est de 2,3°C par rapport à la moyenne 1961-1990⁸. Cette hausse des températures n'est pas sans conséquence et de nombreux changements et phénomènes inhabituels sont déjà observés dans le monde :

- Le réchauffement des océans au cours des cinquante dernières années conduit à une élévation du niveau moyen des mers. Des milliers d'îles et de kilomètres de côtes sont menacés.
- Un changement global du cycle de l'eau peut aussi être observé. Ce phénomène va se renforcer dans les décennies à venir avec la perturbation des systèmes hydrologiques (réduction des glaciers, qualité et quantité des ressources en eau).
- Au niveau du climat, des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus intenses sont attendues, ainsi qu'une diminution des extrêmes de froid. Les événements climatiques extrêmes devraient également augmenter en nombre et en intensité.

6 Néel C., Boithias L., Duplanil E., Duvigneau C., Le Guern C., Métois R., Béchet B., Marseille, F. Branchu P. (2022). Qualité des sols et urbanisme. Construire une méthodologie adaptée aux besoins des territoires et favoriser son appropriation, 112 pages. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5416-qualite-des-sols-et-urbanisme.html>

7 GIEC, 2014. Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

8 Impacts du changement climatique : Atmosphère, Températures et Précipitations : <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>

Ces différentes évolutions ont un impact sur la biodiversité avec le changement de l'aire de répartition de certaines espèces, qui s'accompagne d'une perte de biodiversité globale.

2.1.2 Les scénarios de changement retenus à l'échelle globale

Les mécanismes qui interviennent sont nombreux et complexes, cependant les modèles climatiques ont suffisamment évolué pour permettre des prospectives. Ils confirment ainsi la poursuite des événements observés et leur intensification sans toutefois pouvoir établir jusqu'où cette intensification se poursuivra.

Il n'y a donc pas un, mais des scénarios possibles.

Ainsi, dans son cinquième rapport, le GIEC a défini quatre profils représentatifs d'évolution des concentrations (RCP). Ces RCP sont utilisés par les équipes d'experts pour en déduire :

- Des projections climatiques globales ou régionales,
- Des prospectives socio-économiques et même d'évolution technologique.

A titre d'exemple, au niveau mondial, le réchauffement à la fin du XXI^{ème} siècle est estimé dans une fourchette probable de 0,3 à 1,7°C pour le scénario RCP2.6, scénario le plus optimiste. Le plus pessimiste, RCP8.5 quant à lui, situe cette fourchette entre 2,6 et 4,8°C.

2.1.3 La déclinaison des scénarios climatiques projetés pour la France

En France, les projections présentées par l'ONERC⁹, montrent une hausse plus marquée des températures estivales qu'hivernales quel que soit le scénario modélisé.

Des projections climatiques régionalisées sont réalisées dans des laboratoires de modélisation (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME) à différentes échéances, ceci en fonction des différents scénarios du GIEC. Ces projections montrent :

- pour la période 2021-2050 une hausse des températures moyennes annuelles comprise entre 0,6 °C et 1,3°C, par rapport à la moyenne de référence calculée sur la période 1976-2005. Cette hausse devrait être plus importante dans le Sud-Est de la France en été, avec des écarts à la référence pouvant atteindre 1,5 °C à 2 °C et s'intensifier fortement jusqu'en 2100 pour dépasser les 5 °C.
- une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, comprise entre 0 et 5 jours sur l'ensemble du territoire, voire de 5 à 10 jours dans des régions du quart Sud-Est, pour la période 2021-2050. Une hausse plus importante de ce nombre de jours est modélisée à partir de 2050.
- des modifications du régime des précipitations, avec des précipitations extrêmes comme des sécheresses extrêmes. Une forte incertitude est notée sur la distribution géographique de ce changement.
- une diminution des jours anormalement froids en hiver entre 1 et 4 jours en moyenne, et jusqu'à 6 jours au Nord-Est du pays.

⁹ ONERC – 2014. Le climat de la France au XXI^e siècle - Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer, 64 p.

2.1.4 Le bilan des effets déjà observés en France

Les cartes qui suivent, élaborées sur le site DRIAS¹⁰, présentent les évolutions observées en termes de températures moyennes annuelles et de précipitations entre 1976 et 2005 ainsi que pour trois scénarios, optimiste, moyen et pessimiste les prévisions à différents horizons. Les modèles anticipent une évolution différente des températures et des précipitations en fonction des régions. La région méditerranéenne, le sud-ouest et les régions de montagne devraient connaître une évolution plus importante des températures et des précipitations.

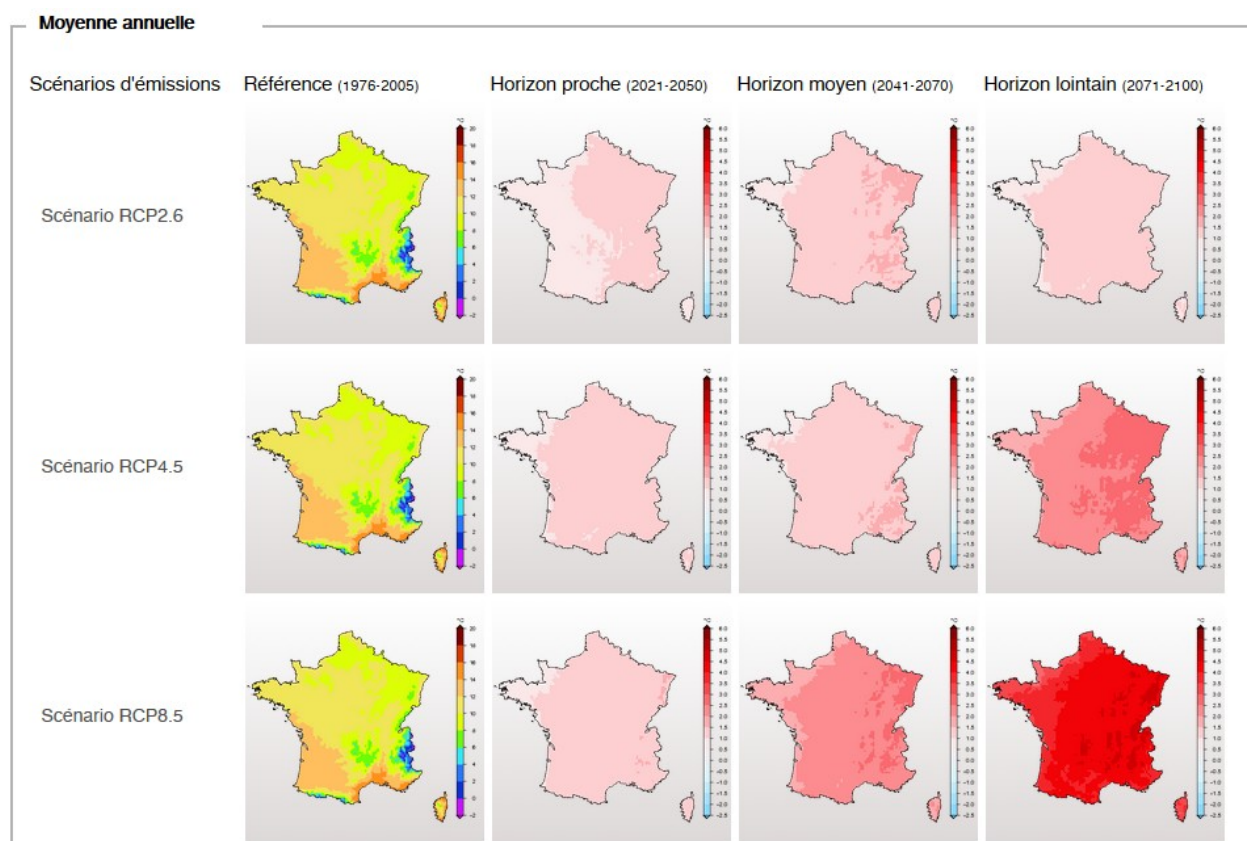


Illustration 6: évolution des températures en France métropolitaine passée (1976-2005) pour différents horizons à venir (échelle d'évolution des températures pour l'ensemble des projections : -2° à +6°); ceci pour plusieurs scénarios établis par le GIEC – Source : DRIAS

10 Site DRIAS – les futurs du climat. Simulations climatiques pour la métropole. <http://www.drias-climat.fr/>

Moyenne annuelle

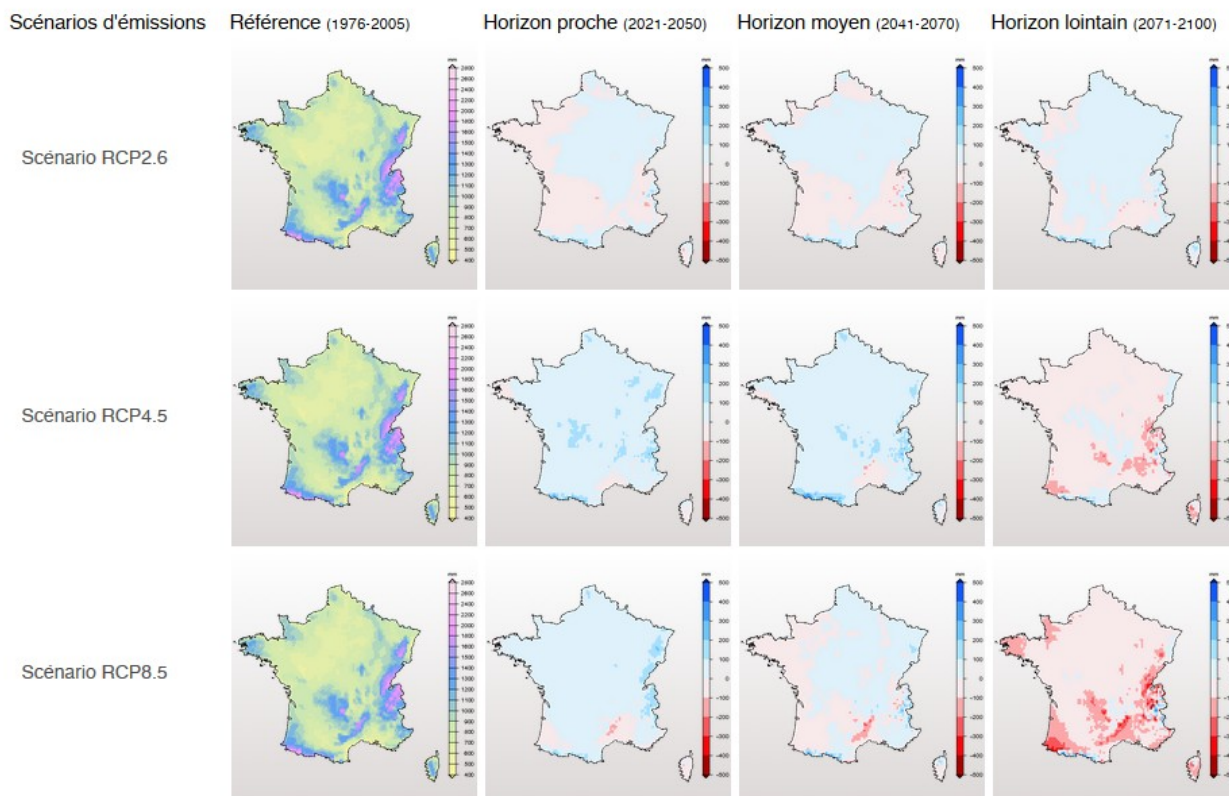


Illustration 7: évolution des précipitations en France métropolitaine passée (1976-2005) et pour différents horizons à venir; ceci pour plusieurs scénarios établis par le GIEC – Source : DRIAS

2.2 Les conséquences attendues pour la fin du XXI^{ème} siècle

2.2.1 Un accroissement des incendies et inondations

Si l'amplitude des changements attendus est difficile à évaluer, il est toutefois possible de dégager des tendances.

La carte qui suit montre une évolution du climat en Europe¹¹ différente en fonction de la zone géographique. La France rassemble quatre zones géographiques qui pourront être soumises à des impacts différents.

11 European Environment agency, 2017. Climat change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. EEA report No1/2017.



Illustration 8: Changements observés depuis 1950 et projetés pour les principales zones climatiques européennes (d'après le rapport : *Climat change, impacts and vulnerability in Europe*, 2016)

Différents phénomènes sont identifiés en Europe tels que l'augmentation des températures et une baisse des précipitations en été pour les régions méditerranéennes, continentales et de montagne. Un risque d'incendie accru est attendu pour les deux premières régions.

Une augmentation des événements climatiques extrêmes est observée/projetée avec une hausse du risque inondation pour les régions continentale, atlantique et méditerranéenne.

Le cycle de l'eau est également impacté que ce soit pour les régions de montagne, avec une diminution de la taille et du volume des glaciers ainsi que de l'enneigement. La région méditerranéenne est concernée par une diminution des précipitations et du débit des rivières. Pour les régions atlantiques, une augmentation de ce même débit est attendu en lien avec l'augmentation des événements climatiques extrêmes.

2.2.2 Les processus naturels directement affectés dans les sols

Le rapport du GIEC « changement climatique et terres émergées » de 2019¹² liste, à l'échelle mondiale, les processus de dégradation des terres exacerbés par le changement climatique, notamment à travers l'augmentation de l'intensité des précipitations, des inondations, de la fréquence et de la gravité des sécheresses, des stress thermiques, des périodes de sécheresse, du vent, de l'élévation du niveau de la mer et de l'action des vagues, du dégel du pergélisol.

L'illustration 9 fait le lien entre la variation de la température moyenne à la surface du globe par rapport aux niveaux pré-industriels (°C) et les systèmes menacés : denrées alimentaires, moyens de subsistance, santé, infrastructures....

¹² GIEC, 2019 : Changement climatique et terres émergées: rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendía, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (dir. publ.)].

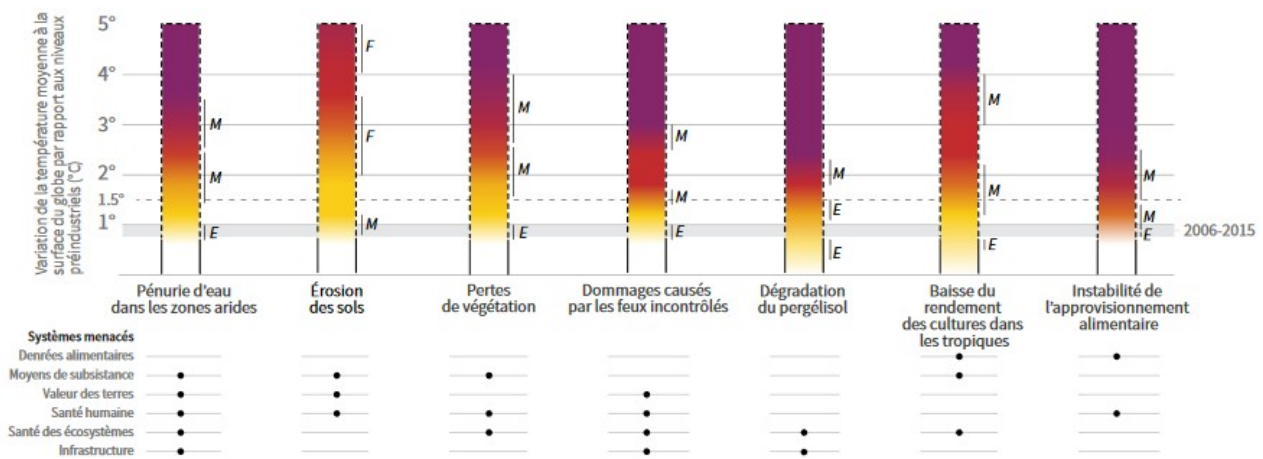


Illustration 9: Lien entre la variation de la température moyenne à la surface du globe par rapport aux niveaux pré-industriels (°C) et les systèmes menacés- Degré de confiance pour la transition: F = faible, M = moyen, É = élevé – source : GIEC, 2019

En Europe et plus particulièrement en France, le changement climatique va impacter les sols à travers l'évolution de la température et du régime des précipitations (réchauffement, augmentation des périodes de sécheresse estivales et des fréquences d'évènements climatiques extrêmes).

Parmi les changements attendus qui ont un impact sur les sols :

- l'allongement en terme de durée et de fréquence des périodes de forte chaleur et de sécheresse estivales via une réduction de leur humidité ;
- la baisse de l'humidité du sol induit des changements de végétation et des perturbations de l'activité biologique modifiant le transfert et la transformation d'éléments chimiques (carbone, éléments nutritifs, polluants...). Les cycles culturaux sont perturbés, ce qui induit également une perturbation du cycle des nutriments qui sont moins consommés et peuvent pour partie être lessivés ;
- la modification du couvert végétal modifie aussi le type et la quantité de matière organique apportée aux sols par la végétation ;
- l'augmentation de l'évapotranspiration et l'élévation du niveau de la mer induit des risques de salinisation des sols littoraux ;
- l'intensification des périodes de sécheresse et de pluie augmente les risques de retrait – gonflement des argiles ;
- l'augmentation du nombre d'évènements climatiques extrêmes renforce les risques d'érosion des sols, de sédimentation dans les cours d'eau mais également de transferts accrus de polluants ;
- une dégradation de la qualité de l'eau associée à la dégradation des sols.

Les processus anthropiques entrant en interaction

Les différents impacts du changement climatique sur les sols, listés précédemment, modifient leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (également appelés facteurs édaphiques) et par voie de conséquence leur évolution.

Cette transformation des sols impacte à son tour les terroirs, l'agriculture, la sylviculture, les paysages et diverses activités économiques.

Sols et adaptation au changement climatique

De la compréhension des mécanismes aux pistes d'actions en contexte urbain

Janvier 2023

D'autres facteurs de stress s'ajoutent au changement climatique tels que l'artificialisation, l'intensification de l'usage des sols, l'agriculture et l'exploitation forestière intensives, le tassement des sols (Illustration 10 adaptée du rapport de l'EEA, 2017¹³). En les limitant et en optimisant le fonctionnement de l'écosystème sol, l'action de l'homme est déterminante pour préserver la ressource sol.

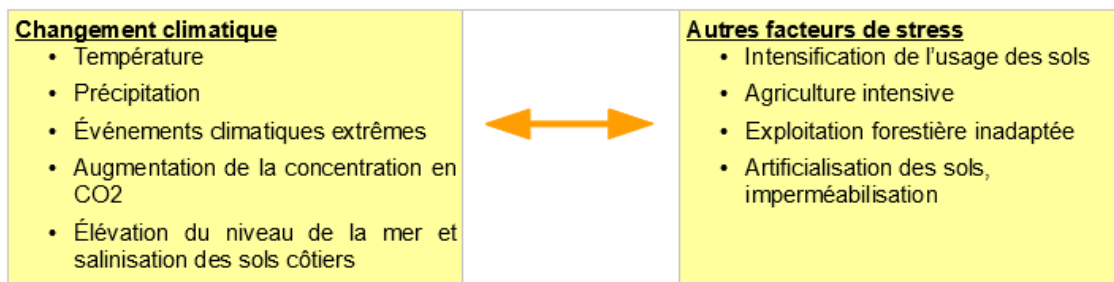


Illustration 10: Impacts combinés du changement climatique et de l'usage des sols (adapté du rapport de l'European Environment Agency, 2017)

2.2.3 Des effets imbriqués à anticiper

Quatre modèles d'évolution du climat sont aujourd'hui retenus par le GIEC. Or, pour chacun de ces modèles, l'orientation et l'amplitude des variations de température, de précipitations ou d'épisodes extrêmes sont hétérogènes à l'échelle de la France. Il est donc difficile d'anticiper l'évolution des équilibres par zones géographiques.

L'impact du changement climatique sur les sols est d'autant plus difficile à anticiper qu'une modification du climat (du biotope) impacte directement l'équilibre des mécanismes se produisant dans les sols. Cela peut conduire soit à :

- **des rétroactions négatives à éviter** : un sol initialement puits de carbone, stockant de la matière organique depuis des décennies peut devenir source de gaz carbonique en cas de dégradation par remaniement ou tassement des premiers centimètres. Cela peut induire une suite d'effets irréversibles (Illustration 11).

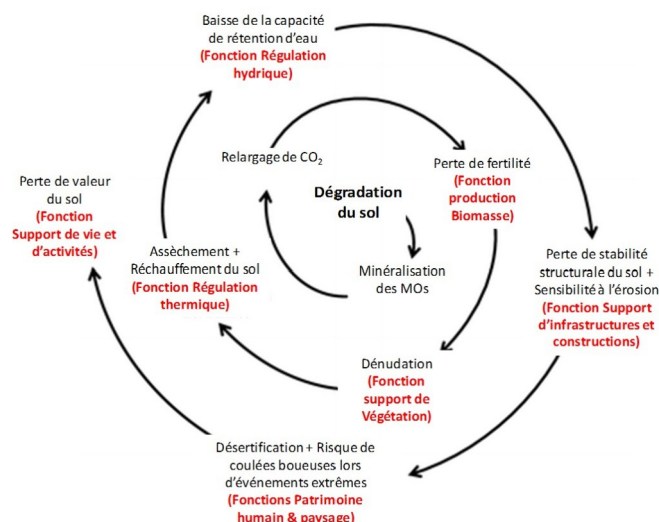


Illustration 11: Exemple de suite d'effets irréversibles induits par une dégradation du sol - D'après (Lal, 2012)

13 European Environment Agency, 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 – An indicator based report. N°1/2017.

- **des rétroactions positives à favoriser** : un sol bien géré peut, au contraire, favoriser des rétroactions de processus qui conduisent à améliorer les fonctions des sols (Illustration 12).

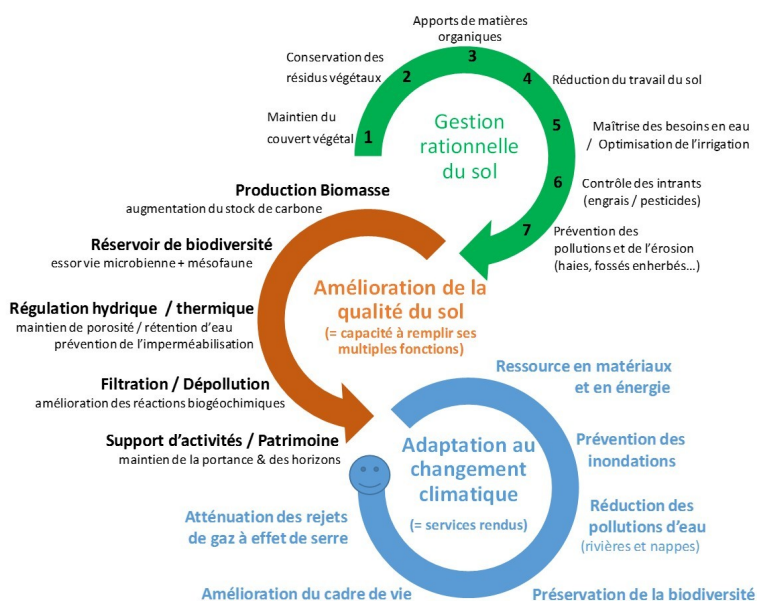


Illustration 12: Exemples de boucles de rétro-actions à favoriser - D'après (Lal, 2012)

3 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FONCTIONS DU SOL

3.1 La fonction régulation du cycle de carbone

3.1.1 Le sol : réservoir naturel de carbone

Lors du processus de photosynthèse, la végétation utilise l'énergie lumineuse pour transformer le CO₂ capté dans l'air en matière organique. Cette matière organique est ensuite incorporée au sol essentiellement sous l'effet :

- la production de litière ;
- la production d'exsudats organiques au niveau des racines ainsi que par les bactéries et champignons microbiens.

Elle est ensuite pour partie stabilisée dans les sols, via les processus d'humification, pour y être stockée pour une période allant de quelques jours à plusieurs siècles ¹⁴.

¹⁴ Dignac M-F, Derrien D, Barré P, Barot S, Cécillon L, Chenu C, Chevallier T, Freschet G, Garnier P, Guenet B, Hedde M, Klumpp K, Lashermes G, Maron P-A, Nunan N, Roumet C, Basile-Doelsch I. (2017) Increasing soil carbon storage : mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37:14. p6-27

Les sols stockent, sous forme de matières organiques, deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère. En France, 3 à 4 milliards de tonnes de carbone sont stockés dans les 30 premiers centimètres de sols, soit trois fois plus de carbone que dans le bois des forêts¹⁵.

À l'échelle mondiale, cette fonction de puits de gaz carbonique est du même ordre de grandeur que celle des océans (2,6 Milliards de tonnes de CO₂ absorbé entre 2000 et 2009 contre 2,3 Milliards de tonnes pour les océans).

3.1.2 Stockage du carbone : équilibre entre minéralisation et humification

La matière organique (MO) fraîchement restituée au sol est fragmentée, incorporée et décomposée en carbone organique (CO) dans les sols par des transformations biologiques physiques (vers de terre, termites et fourmis) et chimiques (bactéries et champignons) qui dépendent de l'environnement (température, humidité). Ce processus de décomposition, appelé humification, conduit à la formation d'humus, c'est-à-dire à la couche superficielle du sol composée de carbone organique stabilisé.

La matière organique fraîche peut également être dégradée en éléments minéraux assimilables par les plantes tels que l'eau, le gaz carbonique, l'azote, le phosphore et le soufre sous l'action de la faune et des microorganismes. C'est un processus rapide appelé la minéralisation primaire. Une minéralisation dite secondaire est également possible et transforme l'humus en ces mêmes éléments minéraux sur des temps plus longs.

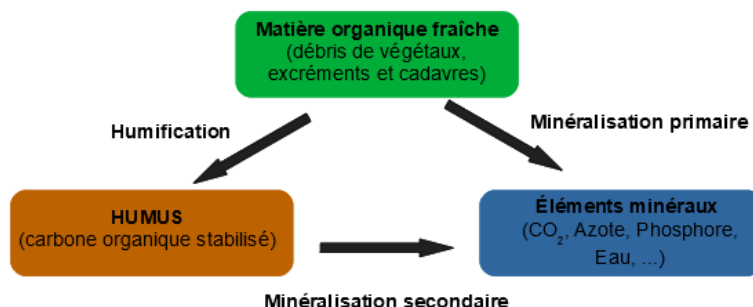


Illustration 13: Transformation de la matière organique fraîche dans le sol

Stocker du carbone organique revient à ralentir voire stopper le processus de minéralisation au bénéfice du processus d'humification. Or, le changement climatique a un impact sur la matière organique des sols, soit en permettant de stocker davantage de carbone, soit en induisant sa décomposition, donc sa minéralisation et l'émission de CO₂.

La teneur en matière organique des sols est la résultante d'un équilibre entre l'apport de résidus organiques par la végétation ou d'autres sources (amendement, compost, lisiers...) et leur décomposition / minéralisation en lien avec l'activité microbienne et les variations des facteurs éda- phiques, c'est-à-dire à la nature du sol.

15 Mousset J. (2014) Carbone des sols : enjeu pour le climat et l'agronomie, ADEME Ed, 15 p.

<http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0085/Temis-0085270/22612.pdf>

Les impacts antagonistes du changement climatique sur la végétation, l'activité microbienne, le stockage et la minéralisation de la matière organique (illustration 14) induisent des effets dont la résultante est difficile à anticiper.

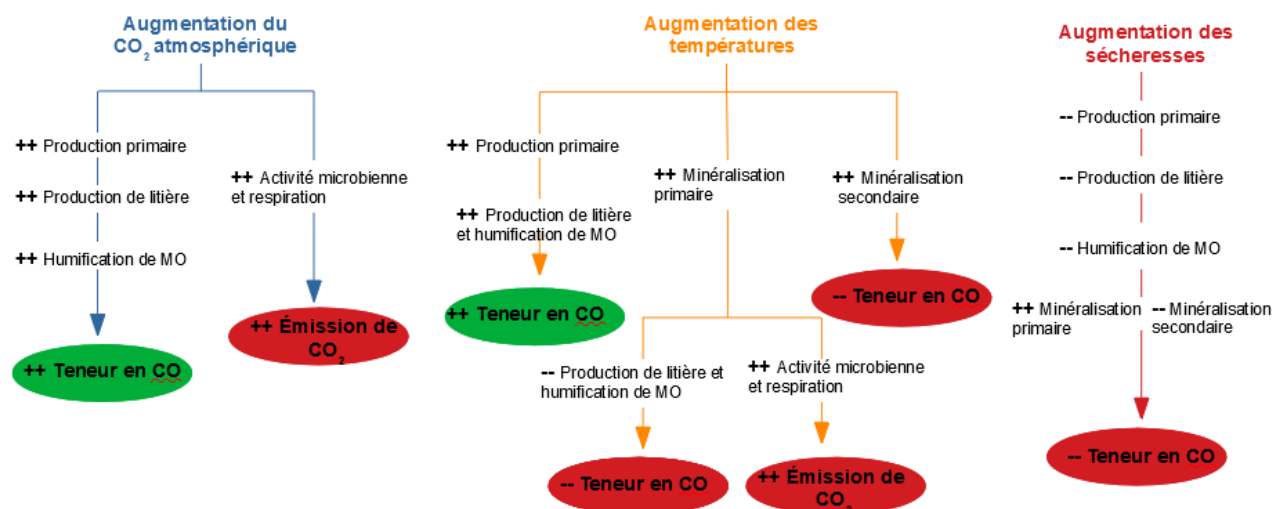


Illustration 14: Impact attendu du changement climatique sur la matière organique et l'activité biologique des sols, tiré et simplifié de l'article Sol et changement climatique par l' « Agence Européenne de l'environnement » (EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe). Les bulles verte et rouge correspondent respectivement à un impact positif et négatif. ++ et - correspondent à une augmentation ou diminution. MO : matière organique, CO : carbone organique

D'après le schéma précédent, l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et l'augmentation des températures vont favoriser sous nos latitudes le développement de la végétation et, de fait, les apports de résidus végétaux dans les sols, avec pour conséquence d'augmenter la teneur en matière organique des sols et le stockage de carbone.

Ces effets sont toutefois compensés par une augmentation : de l'activité microbienne et de la minéralisation de la matière organique. Ce qui conduit au relargage de CO₂ dans l'atmosphère.

Une évaluation de l'impact du changement climatique sur les matières organiques nécessite une analyse de la dynamique d'évolution des stocks et des flux en fonction de l'usage du sol et des pratiques associées à cet usage, tel le choix du système agricole, comme cela a été proposé dans le projet de recherche MOSAIC : dynamiques des matières organiques dans les sols dans divers systèmes agricoles intensifs liés à l'élevage¹⁶.

3.1.3 Cartographie des stocks de carbone dans les sols en France

Le Réseau de mesure de la Qualité des Sols (RMQS), programme du GIS SOL (www.gissol.fr), a dressé une cartographie des stocks de carbone dans les sols.

Le stockage du carbone dans les sols dépend essentiellement du type de sol, du climat, de la végétation et de son mode de gestion (occupation / pratiques). C'est pourquoi les facteurs déterminant la variabilité spatiale des stocks de carbone dans les sols combinent des facteurs naturels tels que :

- la teneur en argile en favorisant la complexation de matière organique (qui dépend du type de sol et de matériel parental du sol)

¹⁶ ANR programme Agrobiosphère, 2013-2017 (cf. <https://www6.rennes.inra.fr/umrsas/Recherche/Les-projets-de-recherches/Nos-projets-ANR/MOSAIC-2013-2017>)

- le climat, en particulier la température et l'humidité qui régissent l'activité microbienne du sol
- la profondeur du sol

et des facteurs anthropiques :

- l'occupation des sols,
- les pratiques agricoles et sylvicoles.

La cartographie ci-contre met en avant des stocks plus faibles de carbone (< 15 t/ha) dans les sols du Languedoc-Roussillon (région fortement viticole et caractérisée par un climat chaud et des sols peu épais) et dans quelques zones de culture très intensive (Beauce Chartraine, Nord). Les stocks de carbone faibles à moyens (40-50 t/ha) se retrouvent dans les sols de plaines agricoles de grandes cultures ainsi que dans des sols limoneux comme par exemple sur le pourtour du Bassin parisien et du Bassin aquitain, le Toulousain et le nord du sillon rhodanien.

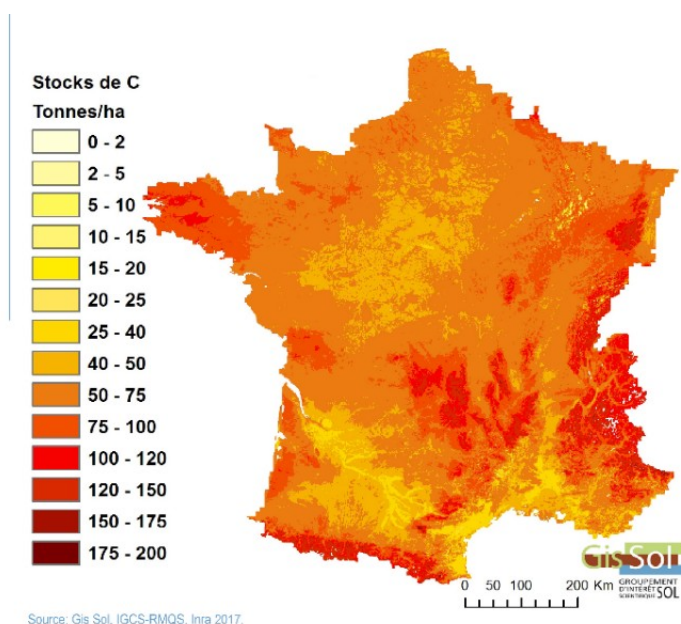


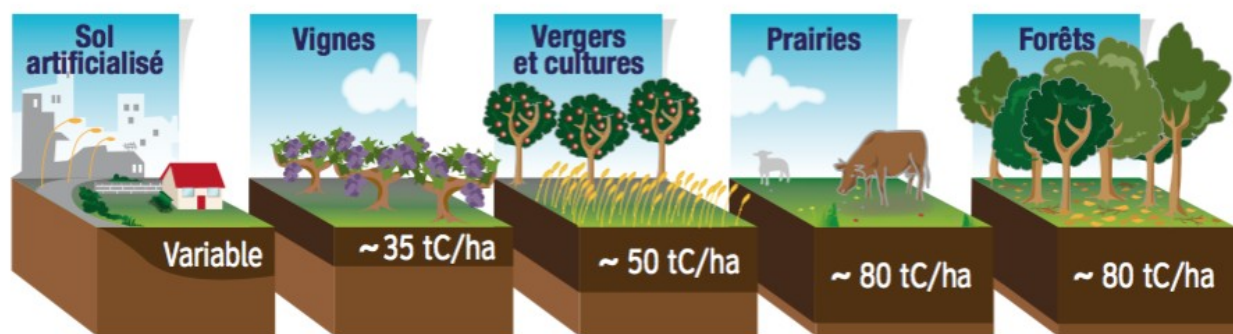
Illustration 15: Estimation des stocks de carbone organique dans les sols (0-30 cm de profondeur) en France métropolitaine hors Corse - Gis Sol, IGCS-RMQS, Inrae, 2017, traitements : sdes 2019

Les stocks de carbone moyennement élevés (50-70 t/ha) sont caractéristiques des grandes régions forestières ou fourragères de France (Bretagne, Est, Massif central, Normandie) et les stocks de carbone les plus élevés correspondent à des situations climatiques (sols situés en altitude), minéralogiques (sols volcaniques du Massif central) ou hydriques extrêmes (marais de l'Ouest, delta du Rhône).

3.1.4 Rôle déterminant de l'homme : occupation des sols et pratiques agricoles

Le stock de MO est élevé dans les forêts, les prairies et les pelouses d'altitude mais faible en viticulture, dans les zones méditerranéennes et de cultures. Les stocks sont difficilement quantifiables en zone urbaine mais des réserves conséquentes peuvent exister sous les espaces verts. Pour les forêts, le stock de carbone dans la litière n'est pas pris en compte. (Source GIS sol).

■ Variation des stocks de carbone organique selon l'affectation des sols en France



XX Estimation du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres du sol

source GIS sol

Illustration 16: Variation des stocks de carbone organique selon l'affectation des sols en France (GIS sol)

L'action de l'homme est déterminante car l'équilibre entre humification et minéralisation des matières organiques du sol reste en faveur de l'humification (stockage du carbone organique) uniquement si :

- l'horizon organique superficiel du sol n'est pas ou rarement retourné, limitant ainsi la minéralisation ;
- le bilan apport / export de matière organique reste positif notamment si des apports de matières d'origine animale en partie stabilisées équilibrent suffisamment les exports de litière fraîche par pâturage ou fauchage.

Le stock de carbone du sol, accumulé au cours des années en lien avec certains modes de gestion et d'occupation du sol, peut être libéré rapidement lors du remaniement de l'horizon humifère, par exemple lors de travaux de construction ou d'aménagement.

Une étude menée par l'INRAE visant à évaluer le potentiel de stockage du carbone des sols en France a montré que la mise en œuvre de pratiques agricoles favorisant le stockage du carbone, comme les cultures intermédiaires, l'enherbement des inter-rangs dans les vignes et les vergers ou l'implantation de haies ou des pratiques d'agroécologie associant pâturage et vergers, permettrait une augmentation de la teneur en carbone de 1,9 pour 1000 dans les sols^{17,18}. En plus d'augmenter la fertilité des sols cela permettrait de compenser 6,8 % des émissions de GES toutes confondues en France métropolitaine. L'initiative 4 pour 1000¹⁹ démontre que l'augmentation de 4 g de carbone dans les sols pour 1000 g de CO₂ permettrait de compenser les émissions des GES en 1 an à l'échelle planétaire.

17 Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? INRAE. Décembre 2020

18 Approche à l'échelle du paysage de la dynamique des Matières Organiques des Sols dans des systèmes Agricoles Intensifs liés à l'élevage, et dans un contexte de Changements globaux. – projet MOSAIC
<https://anr.fr/Projet-ANR-12-AGRO-0005>

19 Initiative internationale « 4 pour 1000 ». Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat.



A retenir

Les matières organiques jouent un rôle majeur dans un grand nombre de fonctions du sol et conditionnent de ce fait l'ampleur des impacts du changement climatique :

- *elles interviennent sur la structure et la porosité des sols et donc sur :*
 - *leur capacité d'infiltration permettant de limiter les risques d'inondation et d'érosion,*
 - *ainsi que sur leur capacité à stocker l'eau et à la restituer aux végétaux.*
- *elles interviennent dans le cycle des nutriments : les sols riches en matière organique sont généralement des sols fertiles ;*
- *elles favorisent le développement de la biodiversité ;*
- *elles piègent les polluants ;*
- *elles participent à l'atténuation du changement climatique en stockant le carbone dans le sol.*

3.2 Les fonctions d'infiltration, stockage et réserve d'eau (rétention, infiltration, évapotranspiration)

3.2.1 Le sol : régulation des flux d'eau

Le sol constitue un régulateur des flux hydriques en surface comme en profondeur.

Sa capacité à laisser s'infiltrer l'eau (ou perméabilité) et à stocker de l'eau (réservoir utile) dépend à la fois :

- de sa texture (ou de sa granulométrie) : le sol étant d'autant plus perméable que les grains sont grossiers ;
- de sa structure largement influencée par le système racinaire des plantes, sa texture et sa teneur en matière organique ;
- de son taux d'humidité : plus un sol est sec plus l'infiltration de l'eau sera difficile.

Le sol infiltre l'eau et exerce un pouvoir tampon sur le régime des eaux superficielles et participe à la recharge des eaux souterraines – un sol étant d'autant plus capable de laisser s'infiltrer l'eau vers les nappes qu'il reste humide en surface.

L'eau circulant dans le sol joue un rôle prépondérant dans de nombreux processus environnementaux tels la dissolution, le dépôt, la transformation, la dégradation et le transport de diverses substances. De nombreuses réactions chimiques ont lieu à l'interface entre la solution du sol, à savoir l'eau contenue dans le sol, et sa phase solide minérale ou organique, y-compris des organismes vivants dans le sol.

Le sol permet surtout l'alimentation en eau des organismes vivants, végétation mais également micro-organismes des sols (bactéries, champignons, etc) qui la restituent à l'atmosphère, principalement via la transpiration des plantes = évapotranspiration.

L'eau retenue alimente le réservoir disponible pour la végétation, appelée réserve utile. En agromonie, cette dernière correspond à la différence entre la capacité au champ (i.e. quantité d'eau retenue après écoulement de l'eau gravitaire 48 h après des précipitations) et le point de flétrissement (i.e. quantité d'eau seuil à partir de laquelle les plantes ne sont plus capables de prélever l'eau qui est trop fortement liée aux particules de sol).

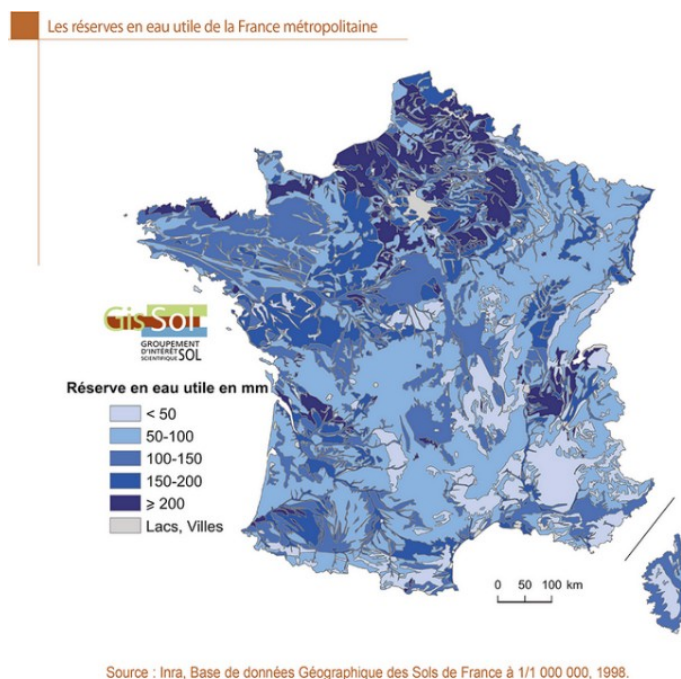


Illustration 17: Cartographie de la réserve utile en eau des sols de France métropolitaine - source site du GIS Sol (<https://www.gissol.fr/>)

L'illustration 17 ci-dessus montre que les sols présentant les plus fortes réserves utiles sont les sols limoneux du bassin parisien puisque ce sont des sols profonds, et ayant une capacité de rétention élevée. En effet, il existe une relation élevée entre réserve utile, profondeur et texture d'un sol.

Le sol est un élément central du cycle de l'eau entre l'eau bleue (celle qui va alimenter les nappes) et l'eau verte (qui sert à la croissance de la plante et est évapotranspirée), eau qui est indispensable pour créer des îlots de fraîcheur.

3.2.2 Implication de la teneur en matière organique du sol sur le stockage de l'eau

Il existe des interactions entre le stock de carbone dans le sol et sa capacité de rétention en eau puisque la matière organique participe à la structuration d'un sol et à la formation de porosité. A titre d'exemple, dans un sol saturé en eau en permanence, la décomposition de matière organique est fortement ralentie et le sol peut alors agir comme réservoir de carbone (tourbières et sols de zones humides).

A contrario, comme l'indique l'illustration 13, l'augmentation de la température estivale et de la concentration en CO₂ de l'atmosphère, peuvent conduire à une augmentation de la production végétale, avec pour conséquence une augmentation de la consommation en eau du sol. Cette production végétale peut être réduite par le déficit en eau disponible pour les plantes, induit par l'augmentation concomitante des périodes de sécheresse estivale (effet de rétro-action).

D'une manière générale :

- une diminution du stock des matières organiques a un impact sur la structure du sol, et par conséquent sur sa porosité, réduisant sa capacité à retenir l'eau et à la restituer au végétal ; ce qui peut entraîner en milieu urbain une réduction de l'évapotranspiration et l'aggravation des îlots de chaleur urbain
- une perte de capacité de rétention d'eau induit une sécheresse de l'horizon superficiel du sol, réduit sa perméabilité et par la suite sa capacité à laisser s'infiltrer l'eau de pluie. Le risque d'inondation est alors accru en cas de pluies de forte intensité se produisant en période sèche ;
- la perte en matière organique des sols amplifiera aussi la sensibilité des sols à l'érosion éolienne et hydrique ce qui peut conduire, dans des cas extrêmes, à la désertification ;

Par conséquent, la perte de matière organique dans les sols contribue non seulement à restituer du CO₂ dans l'atmosphère mais aussi à déséquilibrer la fonction de régulation hydrique des sols et ce de manière plus ou moins réversible, selon l'effet modérateur que peut jouer la végétation ou non.

3.2.3 Effet des activités anthropiques sur la réserve en eau utile par les plantes et la capacité d'infiltration des sols

L'homme peut favoriser ou au contraire réduire la porosité d'un sol par son action. Par exemple, un labour occasionnel conjugué à l'apport de matières organiques favorise la porosité. En milieu agricole, forestier ou en phase chantier d'aménagements, le passage d'engins lourds sur des sols humides où leur portance est réduite, compacte le sol en réduisant les pores de grande taille, diminuant la capacité d'infiltration, et en augmentant les pores de petite taille, augmentant le stock d'eau mais aussi le risque de saturer le sol et d'empêcher les plantes de s'alimenter en eau et nutriments. En milieu urbain, un revêtement imperméabilisant réduit la capacité du sol à infiltrer l'eau.

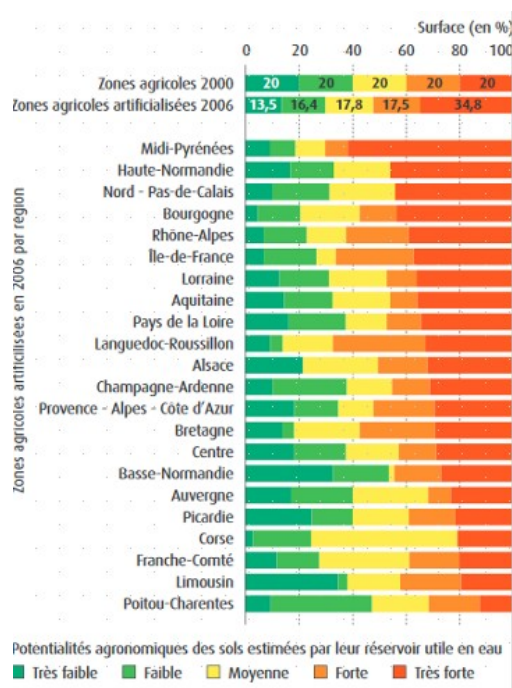


Illustration 18: Surfaces régionales artificialisées sur la période 2000-2006 réparties par réservoir en eau utile des sols – source SoeS, 2014

Comme l'indique l'illustration 18 issue d'une étude du Système d'Observation des Sols (SOeS), 52,3 % des espaces agricoles artificialisés entre 2000 et 2006 correspondent à des sols ayant un réservoir utilisable et donc un potentiel agronomique élevé à très élevé. Ceci s'explique par des raisons de facilité d'accès, à proximité de villes et de réseaux d'infrastructure. Pour les régions Languedoc Roussillon, Île-de-France et Midi Pyrénées, l'artificialisation s'est faite sur des sols présentant une qualité agronomique forte à très forte du point de vue de leur réserve utile²⁰. L'artificialisation des sols impacte durablement leur capacité d'infiltration, stockage et filtration de l'eau.

3.2.4 Impacts du réchauffement climatique sur l'infiltration de l'eau et risques associés

Des diminutions significatives de l'humidité des sols ont été observées en été dans la région méditerranéenne et plus globalement à l'échelle de la France (zones en marron sur l'illustration 19). L'accentuation de ce phénomène est projetée dans les décennies à venir.

²⁰ SoeS 2014. L'environnement en France, chapitre état des milieux – Les sols. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/References/2014/ree-2014/ree2014-chapitre1-souspartie3.pdf

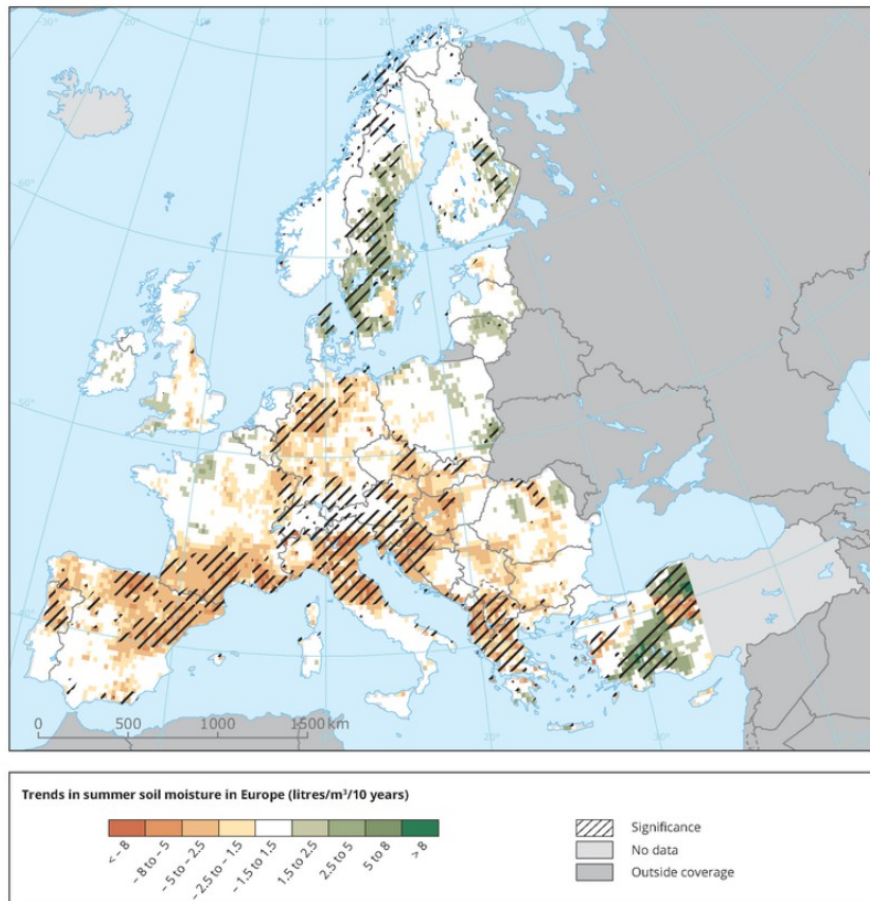


Illustration 19: évolution de la teneur en eau des sols en été sur la base d'observations passées (1961-1990) et de projections (2021-2050) Source : European Environmental agency 2017 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/changes-in-summer-soil-moisture>

Les impacts induits par cette tendance à l'assèchement des sols sont d'ampleur variée en termes d'échelle de temps et d'espace, comme de réversibilité, selon le contexte :

- **à l'échelle d'une pluie et d'une parcelle** : la perte de perméabilité liée à l'assèchement des sols augmente le ruissellement de l'eau de pluie en surface et donc le risque d'inondation et d'érosion des sols, en particulier pour les pluies de forte intensité. Ce phénomène peut être modéré si des mesures locales sont prises pour favoriser l'infiltration à la source de l'eau de pluie (désimperméabilisation et/ou végétalisation des surfaces urbaines, couvert végétal mort ou vivant à l'échelle des parcelles agricoles, bandes enherbées, engazonnement des vignes... ..) ;
- **à l'échelle de l'année sur un bassin hydrologique (bilan hydrologique)** : la perte de perméabilité peut se traduire par une réduction générale de la recharge annuelle en eau des nappes souterraines par le sol du fait d'un déficit d'infiltration de l'eau, relativement à la part d'eau évaporée ou ruisselée en surface ; ce mécanisme peut être amplifié par l'activité humaine, suivant son mode d'occupation du sol ;
- **à l'échelle de plusieurs saisons** : les successions de pluie et d'assèchement du sol peuvent engendrer une perte de sa qualité géotechnique et par la suite de sa fonction de support durable de construction et d'infrastructure sous l'effet :

- soit d'aléas retrait-gonflement, dans les zones de sols et/ou sous-sols argileux sensibles à cet aléa (i.e. sols contenant de la smectite) ;
- soit d'aléas cavités par dissolution dans les zones où le sol et/ou sous-sol contient des minéraux hydrosolubles (sels, gypse).

(cf. §4.5)

3.3 La fonction de production végétale

3.3.1 Le sol : support de végétation

Le sol est support de végétation dès ses premiers centimètres. Il a dans ce cadre un triple rôle :

- Support physique permettant l'enracinement et la résistance à l'effet du vent,
- Réservoir d'eau, traité précédemment,
- Réservoir de nutriments.

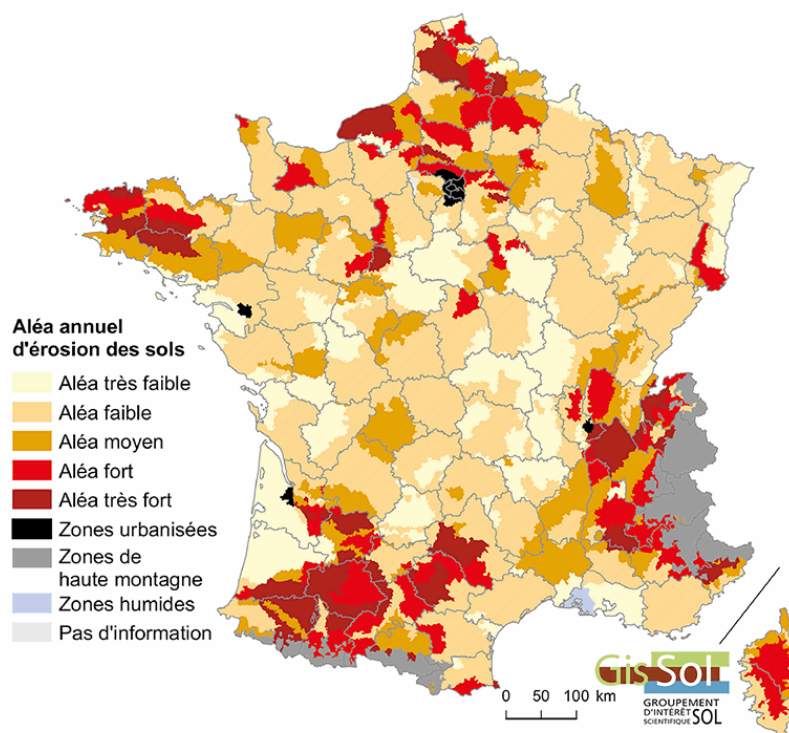
Cette fonction implique de préserver une profondeur et une stabilité suffisante des sols pour permettre aux végétaux de s'enraciner. Cette profondeur est très variable et fonction de la végétation : quelques centimètres sont nécessaires au développement d'une couverture herbacée à plus d'un mètre pour les arbres.

L'épaisseur du sol influence son réservoir utilisable (cf. plus haut). Elle influence également la teneur en matière organique participant au cycle des nutriments nécessaires à la végétation. La densité du sol constitue également un élément clef, la présence de zones plus ou moins denses va en effet empêcher les racines de se développer librement.

3.3.2 L'altération par érosion du sol non couvert et impact des activités anthropiques

L'érosion des sols, est un phénomène naturel qui résulte de l'ablation des couches superficielles du sol et du déplacement des matériaux le constituant, principalement sous l'action de l'eau et du vent. L'érosion hydrique, caractérise le départ de sol sous l'action du ruissellement des eaux de pluies ne pouvant s'infiltrer dans le sol.

En 2011, le système d'observation des sols (SOeS) relevait qu'en France métropolitaine près de 18 % des sols présentent un aléa d'érosion moyen à très fort (Illustration 20). L'érosion hydrique des sols toucherait 26 millions d'hectares en Europe, contre un million pour l'érosion éolienne.



Source : Gis Sol-Inra-SOeS, 2011.

Note : L'aléa d'érosion des sols par petite région agricole est estimé à l'aide du modèle Mesales (Modèle d'évaluation spatiale de l'aléa d'érosion des sols), développé par l'Inra. Il combine plusieurs caractéristiques du sol (sensibilité à la battance et à l'érodibilité), du terrain (type d'occupation du sol, pente) et climatiques (intensité et hauteur des précipitations). L'aléa est caractérisé par cinq classes représentant la probabilité qu'une érosion se produise.

Illustration 20: Cartographie de l'aléa érosion en France par petites régions agricoles - source : GIS Sol - INRAE - SOeS, 2011

L'érosion hydrique des sols peut se manifester sous diverses formes :

- de manière catastrophique par des départs d'importants de volume de sol sous forme de coulées d'eau boueuses ;
- ou de façon chronique et moins visible, par des départs saisonniers de l'horizon de surface du sol qui, lorsque cette forme n'est pas maîtrisée, peut provoquer, à long terme, une dégradation irréversible des sols.

Dans les deux cas, l'érosion hydrique est à la fois :

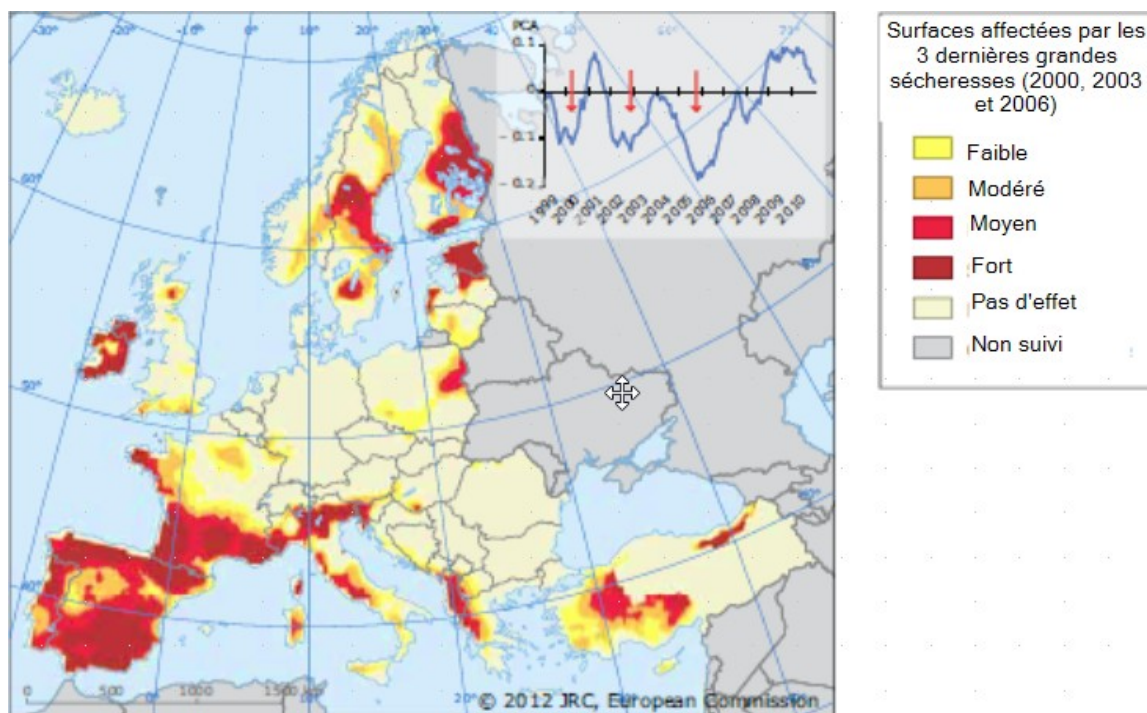
- directement favorisée par la dérive climatique, en particulier lorsqu'elle se traduit par une augmentation des occurrences de pluies de forte intensité provoquant l'arrachement et le transport des particules de sol - ce phénomène est accru si le sol a perdu son couvert végétal.
- indirectement lorsque le sol s'assèche en surface et perd sa perméabilité ou capacité à infiltrer l'eau – ce phénomène est accru lorsque le sol a perdu sa teneur en matière organique et/ou la structure de son humus.

Outre la perte de sols, l'érosion hydrique a pour conséquence le transport vers les milieux aquatiques de quantités importantes d'azote et de phosphore à l'origine de l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques et terrestres à la fois localement et de manière plus globale.

Au-delà de ces facteurs naturels, l'homme joue un rôle déterminant dans l'érosion hydrique des sols à travers de mauvaises pratiques susceptibles d'amplifier le phénomène comme certaines pratiques culturales (culture dans le sens de la pente ou peu couvrante, etc.) surpâturage, déforestation, imperméabilisation. Ainsi, un sol limoneux (particulièrement fragile face à l'érosion car souvent peu structuré), sur pente forte, non couvert par des cultures d'hiver et soumis à des pluies intenses est particulièrement vulnérable à l'érosion. Des choix d'usages et pratiques adaptés permettent alors de limiter l'érosion : Le risque d'érosion des sols peut être limité par une urbanisation et une artificialisation modérées respectant les zones sensibles et par le recours aux dispositifs de prévention des coulées d'eau boueuse (haies, taillis et bandes enherbées limitant le ruissellement, fascines).

3.3.3 Effets irréversibles induits par des sécheresses récurrentes

Les périodes de sécheresse récurrentes comme les événements climatiques extrêmes induisent un risque accru de dégradation des sols. De tels phénomènes de dégradation des sols sont déjà observables dans certaines zones climatiques européennes telles que la zone méditerranéenne (Illustration 21).



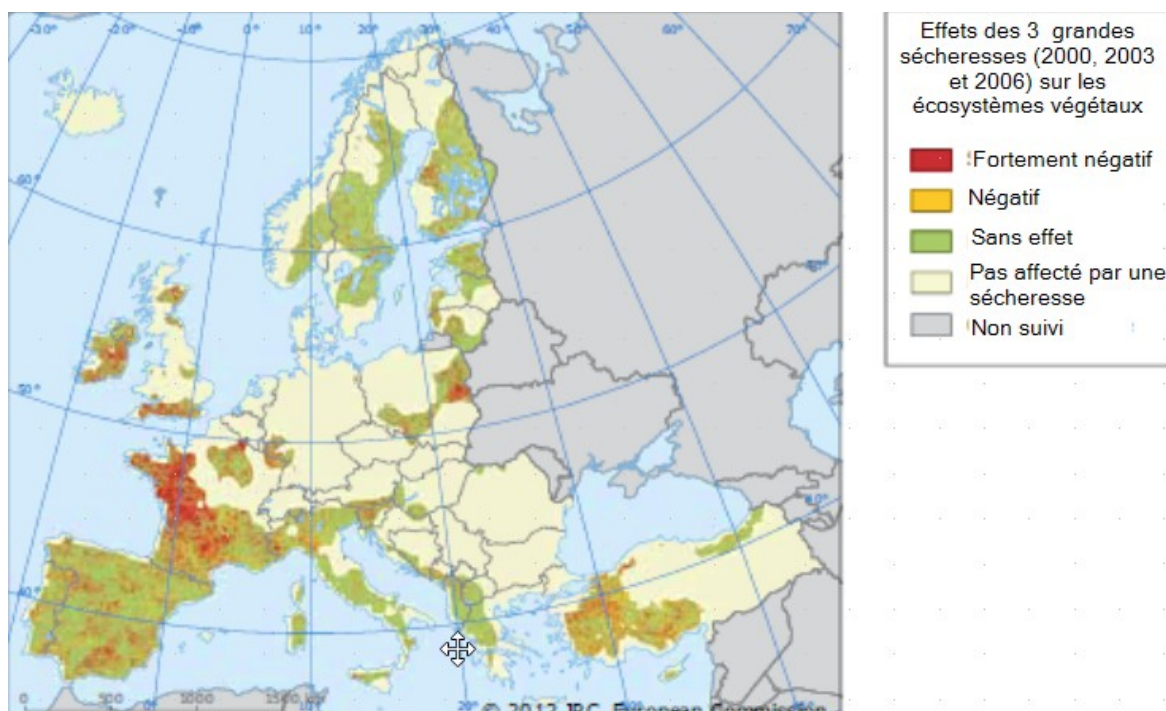


Illustration 21: Surfaces affectées par les trois grandes périodes de sécheresse -2000, 2003, 2006- en Europe et leurs effets sur les écosystèmes végétaux - source : EEA, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe

Les conditions climatiques, l'agriculture intensive, le besoin en irrigation et l'usage des sols dans cette zone la rendent particulièrement vulnérable. Le phénomène peut être amplifié par des pressions spécifiques telles que la salinisation des sols en zone littorale ou les incendies en zone de forêt. La dégradation des sols peut, dans le cas d'une conjugaison de la sécheresse avec l'un de ces aléas, devenir irréversible et conduire à la désertification par l'enchaînement des impacts suivants :

- **réduction de la couverture végétale** qui accentue le risque de tassement et donc d'imperméabilisation de la surface du sol, avec augmentation du risque d'érosion éolienne et hydrique du sol ;
- **diminution de la production de biomasse entraînant** des apports plus faibles en matière organique pouvant accentuer le risque de tassement du sol, la perte de sa biodiversité et de sa capacité de rétention d'eau ;
- **aggravation des phénomènes d'érosion** de l'horizon humifère de surface du sol par ravinement, glissement ou coulée boueuse lors de pluies de fortes intensités, perte des matières organiques et accentuation de l'assèchement de l'horizon de surface du sol ;
- **accentuation de l'assèchement du sol** induisant une sensibilité accrue aux feux de forêt et éventuellement un risque de salinisation s'il y a des risques d'intrusion d'eau saline. Ces deux impacts se traduisent par une perte plus ou moins irréversible de la capacité de production de biomasse du sol avec à terme, un risque de désertification.

3.4 La fonction réservoir de biodiversité

3.4.1 Les organismes du sol

Les sols hébergent près d'un quart de la biodiversité de notre planète. Par exemple, 1g de sol est composé de 10^7 à 10^9 bactéries et les vers de terre représentent la plus grande biomasse. Les organismes sont majoritairement présents dans les 2 à 3 premiers centimètres du sol. Ils peuvent se classer en 3 catégories selon leur fonction :

- les ingénieurs chimistes regroupent principalement les microorganismes (bactéries, champignons, algues et virus) et assurent la décomposition de la matière organique en éléments nutritifs pour les plantes comme l'azote ou le phosphore. Certains sont capables de dégrader les polluants organiques (hydrocarbures ou pesticides).
- les régulateurs biologiques regroupent les organismes de petite taille comme les nématodes, collemboles et acariens et assurent le contrôle des dynamiques de population des microorganismes et limiter la prolifération de pathogènes.
- les ingénieurs physiques regroupent les organismes les plus grands comme les vers de terre, les termites et les fourmis. Ils structurent les sols en offrant des habitats pour les autres organismes et en permettant le transfert de l'eau et la distribution de la matière organique.

La présence des organismes dans les sols dépend du type de sol, de son humidité et de son usage. Ils ont un rôle écologique majeur puisqu'ils permettent de fertiliser les sols, protéger les cultures, réguler le cycle de l'eau, lutter contre l'érosion, dépolluer les eaux et les sols et constituent une ressource génétique et chimique pour la santé humaine.

3.4.2 Les rétro-actions du système climat-biodiversité

Les sols constituent l'un des milieux les plus complexes des écosystèmes terrestres puisqu'ils abritent une grande diversité d'organismes vivants qui établissent entre eux des interactions multiples et pouvant se substituer les unes aux autres.

Sous le contrôle du climat, le fonctionnement de cet écosystème terrestre est assuré, en partie, par les interactions entre les communautés végétales, animales et les organismes vivants dans le sol avec les cycles du carbone, de l'azote, du phosphore, de l'eau et de l'atmosphère²¹.

Si le changement climatique influence la biodiversité, l'inverse est également vrai. La biodiversité joue un rôle prépondérant dans l'adaptation au changement climatique et peut être source de solutions : par exemple, une meilleure gestion de la biodiversité des sols améliore la résilience des agroécosystèmes et leur adaptation au changement climatique en permettant aux sols d'assurer pleinement leurs fonctions liées au cycle de l'eau, du carbone, des nutriments et au climat.

Les interactions entre les réponses au changement climatique, de la composition des communautés végétales d'une part et des communautés animales et microbiennes du sol d'autre part, régulent ses effets. Par exemple, l'augmentation sous les effets de la sécheresse, de l'abondance de plantes à croissance et à métabolisme plus lent, avec des tissus plus résistants à la décompo-

²¹ Lavelle (2017). Les mécanismes d'adaptation de la biodiversité aux changements climatiques et leurs limites. Rapport adopté par l'Académie des sciences en séance plénière le 27 juin 2017. Fiche thématique de P. Lavelle : « Gérer la biodiversité des sols pour améliorer la résilience des agrosystèmes et leur adaptation au changement climatique ».p. 133-135

sition par les organismes du sol, conduit à un ralentissement du recyclage du carbone et de l'azote dans le sol, et donc à une plus forte séquestration du carbone et une baisse de la fertilité²². Ce type de rétroactions contribue aussi à modifier les émissions de gaz à effet de serre par les écosystèmes vers l'atmosphère²³.

3.4.3 Mécanismes d'adaptation au changement climatique de la biodiversité

Une méta-analyse de Blankinship et al., (2011)²⁴ a montré que :

- **l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère** serait favorable à la microflore et la microfaune (organismes visibles au microscope : nématodes, bactéries, champignons, algues ...) et défavorable à la mésofaune (organismes visibles à la loupe : acariens, collembolles) du sol. L'impact sur la mésofaune pénaliserait la fragmentation de la litière et donc l'incorporation des matières organiques dans le sol ;
- **l'augmentation des températures** impacterait négativement les organismes du sol dans les régions présentant à la fois des moyennes annuelles de températures et de précipitations basses (ex. sols de montagne) ;
- **le décalage des saisons**, tel le démarrage précoce du printemps, induirait la migration d'espèces vers des régions précédemment plus froides et déréglerait les équilibres entre proie et prédateurs.

L'impact est d'autant plus marqué dans les régions de haute altitude et latitude pour lesquelles le réchauffement climatique induira une concurrence accrue des espèces communes vis-à-vis des espèces actuellement inféodées à ces environnements :

- **effets sur les migrations en altitude** : en région montagneuse, les étages forestiers se déplacent vers le haut, ce qui laisse supposer que les organismes du sol suivent, car ils sont intimement liés aux plantes. Cette migration vers les étages supérieurs serait de un à quatre mètres tous les 10 ans ;
- **effets sur les migrations en latitude** : une augmentation de température de 1 °C correspondrait en France à un décalage des zones climatiques d'environ 200 km vers le nord (Lavelle, 2017).

Les peuplements arborés seront parmi les plus lents à suivre ces déplacements de leur niche climatique, avec des effets attendus marqués de déséquilibre végétation-climat dans des décennies ou des siècles (Lavelle, 2017), dont les conséquences sur les sols n'ont pas encore fait l'objet d'études.

22 Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, van der Putten WH, Wall DH. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*. 2004 Jun 11;304(5677):1629-33. doi: 10.1126/science.1094875. PMID: 15192218.

23 Kardol, P., Campy, C., Souza, L., Norby, R., Weltzin, J., Classen, A., (2010). Climate change effects on plant biomass alter dominance patterns and community evenness in an experimental old-field ecosystem. *Volume 16, Issue 10 October 2010 Pages 2676-2687*

24 Blankinship JC1, Niklaus PA, Hungate BA (2011) A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia*. 2011 Mar;165(3):553-65. doi: 10.1007/s00442-011-1909-0.

3.4.4 Incertitudes sur les relations climat-biodiversité des sols

Peu de données scientifiques existent aujourd'hui pour évaluer les processus évolutifs des organismes vivants dans les sols et leurs interactions face au changement climatique. Si plusieurs études ont été consacrées à la réponse de la biodiversité aux contraintes climatiques, à l'instar des expérimentations de forçage climatique réalisées dans le cadre du projet de recherche PPEPSI²⁵, ces données restent difficiles à projeter sur le long terme. Les données sur les mécanismes d'adaptation de la biodiversité aux changements climatiques restent éparses. Les limites de cette adaptabilité face à la rapidité des changements restent méconnues. La compréhension de la réponse de la biodiversité est d'autant plus difficile à déterminer que l'impact du changement climatique s'ajoute à ceux d'autres activités humaines telles que l'artificialisation, les contaminations, l'agriculture intensive...

De nombreuses recherches sont encore nécessaires pour estimer au mieux le niveau de menace du changement climatique sur la biodiversité des sols et plus spécifiquement sur la diversité et les nombreuses fonctions du microbiote du sol. Dans les agroécosystèmes, des connaissances supplémentaires sont également attendues, sur l'impact du changement climatique sur les pathogènes qui transitent par les sols à l'origine de maladies des végétaux, sur l'expansion des espèces invasives dans les sols ou encore sur la biologie fonctionnelle des sols et l'évolution des relations entre la structure des communautés et les fonctions remplies par ces communautés²⁶.

3.4.5 Implication sur le « bio-réacteur sol » et sa capacité d'épuration

La biodiversité des sols est le garant des processus biologiques permettant leur bon fonctionnement et leur adaptation aux changements, qu'ils soient climatiques ou d'usage. Toutes les fonctions du sol décrites auparavant (régulation des nutriments, du carbone, de l'eau et support de végétation) sont en effet directement liées à la vie du sol et à sa diversité. En conséquence, tout impact du changement climatique sur la biodiversité du sol est susceptible d'altérer les fonctions primaires du sol, en particulier sa fonction de bio-filtration ou de bio-épuration d'éventuels polluants. En effet, les microorganismes sont capables de retenir et dégrader certains polluants.

Un engorgement temporaire du sol en eau, par exemple, peut conduire à un changement brutal de métabolisme des micro-organismes vivant dans le sol, pour finalement conduire à des rejets de gaz à effet de serre, tels le méthane ou les oxydes d'azote, accentuant le changement climatique, et par suite les fréquences d'engorgement par des pluies devenant de plus en plus intenses.

Il peut également s'ensuivre des bio-transformations incomplètes des éléments nutritifs, tel l'azote, produisant des espèces chimiques toxiques (i.e. ammoniac ou nitrite).

Une fréquence accrue de conditions extrêmes de sécheresses ou de température peut induire une sélection de populations microbiennes et affecter la capacité du sol à recycler la matière organique ou à produire certains végétaux ; fonctions directement déterminées par l'équilibre écologique des sols. Un tel déséquilibre de la diversité microbienne des sols peut se traduire par :

- des concrétions biogéniques (croûtes calcaires ou oxydes) contribuant à rendre le sol progressivement inerte et imperméable ;

25 PPEPSI : «Precipitation pattern effects on plant-soil microbial interactions» du programme CORDIS 2009-2012 cf. https://cordis.europa.eu/result/rcn/87325_fr.html

26 Ademe 2016. Sols et changement climatique : impacts et adaptation – État des lieux de la recherche, 97p.

- et par la diminution du pouvoir épurateur des sols, ces deux fonctions constituant, par ailleurs, une voie possible de décontamination de sols pollués par effet de dilution ou de phyto-atténuation.

Si chaque mécanisme de déséquilibre est prévisible, les effets de ces mécanismes cumulés sur les fonctions primaires de sols restent difficiles à prévoir, du fait de la multiplicité des facteurs déterminants. Il est également difficile de prévoir l'impact de l'accélération de certains de ces processus d'évolution de la biodiversité des sols et leur conséquence sur l'écologie plus générale, à savoir la faune et la flore qui devra s'adapter à ces nouvelles conditions.

Ce qu'il est possible d'identifier, en revanche, ce sont les impacts en cercle vicieux, ne trouvant aucun effet de rétroactions pouvant laisser l'espoir d'un retour à un nouvel état d'équilibre, suite au changement climatique.

3.5 La fonction support des infrastructures et aménagements

3.5.1 Impact sur la stabilité des cavités souterraines

L'augmentation attendue de l'intensité des précipitations hivernales et des risques d'inondations associés et la baisse des précipitations estivales et des risques de sécheresses, auront un impact sur la stabilité des cavités souterraines à travers la variation des températures et la variation du contexte hydrogéologique.

Le changement climatique devrait également affecter, avec un certain retard, les eaux souterraines. Sur le territoire métropolitain, pour les nappes soumises à un régime climatique tempéré, cela se traduirait par une amplification du phénomène de battement des nappes souterraines du fait de la conjugaison entre une recharge plus importante durant la période hivernale et l'appauvrissement de la ressource durant la période estivale.

L'eau joue un rôle essentiel sur le comportement et la stabilité des édifices souterrains très sensibles aux battements de nappe (ennoyage ou dénoyage des cavités notamment). La dissolution de certains minéraux, l'humidification ou l'assèchement d'ouvrages rocheux et à plus forte raison la succession d'alternance entre ces deux états, pourraient avoir des conséquences importantes sur leur comportement mécanique.

Ces modifications hydrogéologiques et hydriques constitueraient un facteur aggravant, voire déclenchant, susceptible d'initier ou d'augmenter sensiblement les probabilités de rupture des ouvrages dans le court terme.

L'impact attendu du changement climatique sur les eaux souterraines devrait avoir à la fois un aspect quantitatif et un aspect qualitatif :

- sur le plan quantitatif, les causes naturelles de la modification climatique seraient aggravées par certains comportements anthropiques (augmentation des prélèvements d'eau de nappe) ;
- sur le plan qualitatif, ceci pourrait concerner :

- l'augmentation de l'agressivité de l'eau avec, de ce fait, un impact plus fort dans les roches réservoirs sensibles aux phénomènes de dissolution comme les terrains carbonatés (calcaire, craie) ou évaporitiques (gypse, sel) ;
- l'augmentation de la charge turbide des eaux suite à une érosion plus forte des sols en réponse au surplus de précipitations hivernales (principalement dans la craie du bassin de Paris sous recouvrement limoneux) ;
- le lessivage accru des intrants agricoles notamment au droit des zones de monoculture intensive.

3.5.2 Dissolution du gypse

Les phénomènes de dissolution dans les formations gypseuses (famille des évaporites) sont étroitement liés aux écoulements souterrains. Le paramètre fondamental en termes d'intensité et de cinétique de dissolution est le facteur de disponibilité en eau, directement lié au régime des précipitations.

En ce qui concerne les environnements gypseux, ce sont principalement les variations de régime des nappes qui auront un effet sur les processus de dissolution. En effet, la capacité d'une eau à dissoudre le gypse n'est pas - comme avec les carbonates - directement liée à la pression partielle de CO₂ de la solution.

Dans le cas des évaporites, la capacité de dissolution dépend principalement de la saturation de la solution vis-à-vis du minéral qui est dissous. Plus le renouvellement de la nappe sera important plus le taux de saturation sera maintenu bas et plus la dissolution sera importante et favorisera la formation de vides en souterrain. Ces vides peuvent se propager jusqu'à la surface et donner naissance à des fontis (affaissement de sol provoqué par un éboulement souterrain).

3.5.3 Sécheresse géotechnique – Retrait-gonflement des argiles

Actuellement, l'ensemble des simulations climatiques s'accorde sur une grande probabilité que la France connaisse en été, à l'horizon 2100, une augmentation de la durée des périodes de déficit pluviométrique associée à des températures plus élevées.

Le déficit pluviométrique et l'effet de la végétation induit une diminution de la teneur en eau des sols de surface qui peut générer des phénomènes de retrait des sols supports à matrice argileuse et augmenter leur potentiel de gonflement.

Le retrait-gonflement est un phénomène naturel dû à des variations de volume des sols argileux et marneux sous l'influence de la fluctuation de leur teneur en eau. Cette variation hétérogène de volume au niveau du sol d'assise des bâtiments et des ouvrages est accompagnée d'une modification des caractéristiques mécaniques des sols. Des phénomènes de retrait apparaissent, liés à une diminution de volume du matériau. Ils se traduisent, verticalement par un tassement, et horizontalement par une fissuration. A l'inverse, des phénomènes de gonflement sont également constatés liés à une augmentation de volume du matériau.

En période de sécheresse, ces tassements différentiels provoquent des désordres considérables aux constructions affectant principalement le bâti individuel mais aussi les bâtiments publics et privés, les chaussées routières et certains ouvrages enterrés (canalisations).

Du fait des épisodes de sécheresse estivale supposés plus longs et plus intenses, la profondeur du sol affectée par la sécheresse pourrait être plus importante et amplifierait l'intensité du phénomène de retrait/gonflement en termes de sinistralité.

Les hypothèses retenues pour estimer l'influence du changement climatique sur le phénomène concernent donc l'évolution des fréquences d'occurrences des épisodes de « sécheresse géotechnique ». Car si le changement climatique ne modifie pas l'intensité intrinsèque du phénomène, les sécheresses estivales, risquent de devenir plus fréquentes et conduire à une augmentation du nombre des années présentant une sinistralité importante. Les éventuels effets cumulatifs de sécheresses successives rapprochées pourraient se traduire également par une intensification du phénomène.

Les fluctuations du niveau des nappes phréatiques peuvent également avoir une incidence sur la teneur en eau (dessiccation ou imbibition) dans certaines formations à alternance argilo-sableuse, et contribuer ainsi au déclenchement ou à l'aggravation de mouvements de terrain différentiels liés au retrait-gonflement des argiles.

Le changement climatique devrait conduire d'ici la fin du siècle à une multiplication d'au moins par trois les coûts moyens annuels des dommages imputables au phénomène de retrait-gonflement des argiles.

3.6 Menaces et leviers d'action

3.6.1 Le sol, un milieu essentiel et pourtant menacé

Si le sol rend des services essentiels à l'écosystème et à la vie de l'Homme, il est une ressource non renouvelable, de dégradation rapide (quelques heures à quelques années) par rapport au processus de sa formation (plusieurs centaines voire milliers d'années).

Outre les impacts liés au changement climatique qui vont affecter les sols et leur fonctionnement, les nombreuses pressions anthropiques exercées sur les sols participent à leur dégradation. La Commission Européenne a déterminé dans son projet de directive cadre sur la protection des sols du 22 septembre 2006, huit menaces considérées comme les plus préoccupantes : l'érosion, la diminution de la teneur en matières organiques, la contamination des sols, l'imperméabilisation, le tassement, la diminution de la biodiversité, la salinisation et les glissements de terrains et les inondations.

Fonctions - Menaces	Erosion	Diminution de la teneur en MO	Contamination	Imperméabilisation	Tassement	Perte de biodiversité	Salinisation	Glissement de terrain et inondations
Régulation des flux de GES		x				x		
Régulation cycle de l'eau	x			x		x		x
Production végétale	x	x		x	x	x		x
Réservoir de biodiversité		x				x		
Support d'infrastructures et d'aménagements		x	x	x	x	x		

Illustration 22: Principales menaces sur les fonctions du sol. Source : Commission Européenne, 2006. Projet de directive cadre sur la protection des sols.

Ces menaces affectent directement les fonctions du sol en particulier les fonctions qui ont le plus d'impact vis-à-vis de la santé humaine (production agricole, épuration des eaux, contamination) (Illustration 22). Elles ne s'expriment pas de la même façon et avec la même intensité selon les territoires, et il est à craindre qu'à l'avenir leurs effets sur les sols ne soient amplifiés par l'accélération du changement climatique.

3.6.2 Leviers d'actions pour s'adapter au changement climatique

Les enjeux de la préservation des sols et de leurs fonctions sont multiples tant leur rôle est central et tant les pressions sont fortes. L'évolution démographique, les activités agricoles, industrielles et touristiques, ainsi que le changement climatique peuvent modifier le fonctionnement des sols et provoquer leur dégradation. Les sols sont l'objet de nombreux enjeux comme le développement des villes et des infrastructures, la gestion durable des espaces de vie, la production alimentaire ou énergétique, la garantie d'un approvisionnement en ressources saines, la préservation de la qualité de l'eau et la protection de la biodiversité, la protection contre les risques naturels, la lutte contre le changement climatique.

Face à ces enjeux, la connaissance et la prise en compte des fonctions et services rendus par les sols dans leur gestion apparaît alors essentielle. Des indicateurs de qualité des sols peuvent être définis, caractérisant leur capacité à remplir différentes fonctions ou leur multifonctionnalité, que le décideur ou le gestionnaire pourront utiliser pour orienter leurs choix en matière d'usage ou de gestion des sols.

Afin d'intégrer les enjeux et menaces qui pèsent sur les sols (liés au changement climatique mais aussi à l'aménagement du territoire et à l'usage des sols), différentes mesures peuvent être mises en place à différentes échelles.

Le chapitre qui suit décrit un ensemble de mesures, depuis la planification jusqu'à des mesures très opérationnelles de gestion des espaces, visant à préserver les sols en milieu (péri)urbain dans un contexte d'adaptation au changement climatique.

4 LES SOLS EN MILIEU URBAIN COMME LEVIER D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

En France, 80 % de la population vit en zone urbaine et les sols artificialisés représentent plus de 9 % du territoire dont deux tiers sont imperméabilisés par des constructions ou des infrastructures (routes, parkings, bâti...). Le dernier tiers de sols artificialisés est occupé par des espaces non couverts tels les parcs et jardins, les terrains de sport, les friches industrielles, les zones de chantier.

Pendant longtemps, les sols urbains ont été considérés uniquement comme des supports de construction, dont le fonctionnement était ignoré, jusqu'à il y a peu, des pédologues. Il est acquis aujourd'hui que les sols offrent des services allant bien au-delà et qu'il est nécessaire de prendre en compte leur potentialité d'usage dans la gestion de l'espace urbain.

Malgré tout, l'intérêt porté aux sols urbains du point de vue de leur multifonctionnalité reste récent et les acteurs de leur gestion en ville ont besoin de connaissances, de conseils et d'appui méthodologique pour orienter leurs bonnes pratiques.

4.1 Spécificités des zones urbaines et péri-urbaines

4.1.1 Singularité des sols urbains

Les sols urbains sont marqués par le facteur anthropique qui domine leur pédogenèse. Ce facteur est multiple et a une cinétique très rapide par rapport aux facteurs naturels (cf. plus haut). Fortement anthropisés, remaniés, ils sont complexes et très hétérogènes. Ils sont reconnus pour être :

- souvent imperméabilisés,
- généralement tassés ou compactés,
- potentiellement pollués (hydrocarbures, métaux issus des activités industrielles et artisanales, produits phytosanitaires, ...) et pouvant contenir des déchets,
- remarquables par leurs pH qui peuvent présenter parfois des valeurs acides ou alcalines extrêmes.

Les stocks de carbone en ville ne sont pas négligeables, notamment dans les sols des espaces verts, jardins collectifs et autres espaces urbains végétalisés.

4.1.2 Services écosystémiques des sols : un levier d'actions face au changement climatique

Au regard des éléments décrits au chapitre 3, il apparaît important dans un contexte de changement climatique de préserver en priorité les sols en capacité de remplir le plus grand nombre de fonctions : production de biomasse (agriculture, foresterie), stockage, filtration et infiltration de l'eau, transformation des nutriments et des substances polluantes, réservoir de biodiversité, stockage du carbone, etc. Toutefois, les sols moins fonctionnels peuvent aussi avoir des intérêts paysagers, patrimoniaux ou répondre à des enjeux particuliers du territoire.

La ville a des besoins spécifiques et les sols peuvent rendre des services :

- régulation de l'eau pour lutter contre le ruissellement et les inondations, les submersions,
- fraîcheur apportée par la végétation et les sols désimperméabilisés pour lutter contre les îlots de chaleur,
- agriculture urbaine/maraichage en périphérie afin de réduire les circuits et apporter du lien social,
- filtration et/ou dégradation de certains polluants par les sols via l'action des micro-organismes,
- puits de carbone, amélioration de la qualité de l'air et du bien-être via les espaces verts et la végétation sous réserve de changement des pratiques de gestion des espaces verts.

Si en première approche, un certain nombre de sols semblent importants à protéger comme les sols présentant un fort potentiel agronomique, les sols des zones humides, les sols présentant une biodiversité riche ainsi que les sols en capacité d'infiltrer et de stocker de grandes quantités d'eau, d'autres types de sols sont également à préserver en lien avec leur localisation, et ce, en milieu urbain comme en couronne d'agglomération (agriculture de proximité, etc.).

Les sols des terrains en friches notamment méritent une attention particulière quant à leur gestion : de par la pollution qu'ils peuvent contenir mais aussi vis-à-vis du potentiel de fonctions et services qu'ils peuvent rendre au regard de la temporalité des aménagements éventuellement prévus lors de la réhabilitation des terrains. Il peut être intéressant de ce point de vue de favoriser les techniques de phyto-management, organiser le ré-emploi des terres excavées, préserver les sols en place par l'utilisation de matériaux alternatifs aux matériaux naturels.

4.2 Ville et changement climatique

4.2.1 Le changement climatique en milieu urbain

Le changement climatique a des impacts en ville que l'actualité récente ne cesse de mettre en avant : augmentation de la vulnérabilité aux inondations, accentuation du phénomène d'îlot de chaleur urbain, augmentation de la vulnérabilité du bâti aux phénomènes de retrait/gonflement des sols, etc.

Le rôle de l'occupation du sol y est prépondérant :

- l'augmentation des précipitations augmente les risques de ruissellement et d'inondation sur des sols urbains imperméabilisés,
- les précipitations accrues peuvent amplifier le risque de pollution des sols urbains,
- l'augmentation du nombre de jours de canicule crée des îlots de chaleur et les sols imperméabilisés participent à cet effet.
- la trame verte et bleue, la trame brune doivent orienter les projets d'aménagement afin d'éviter les effets de coupure.

Ainsi l'impact du changement climatique en milieu urbain est souvent aggravé par un certain nombre de facteurs liés à un usage et des pratiques de gestion inadaptés des sols.

En outre, **la spécificité des impacts en zone urbaine est leur interdépendance**, car les villes sont des systèmes très intégrés. Les impacts dans différents secteurs interagissent imposant la nécessité d'une approche holistique, l'approche secteur par secteur étant particulièrement inadaptée aux grandes agglomérations ; tout impact touchant une partie de la ville touchera potentiellement tout le reste de manière indirecte. On peut citer par exemple l'imperméabilisation d'un secteur qui aura, en aval, un impact sur le risque inondation d'un autre secteur.

4.2.2 Les politiques urbaines d'adaptation

La ville constitue **une bonne échelle** pour aborder l'adaptation et se ré-approprier en local une problématique souvent abordée plus globalement. Elle n'est en effet :

- pas trop petite : les villes et intercommunalités sont des acteurs puissants qui ont les moyens d'action pour mettre en œuvre des politiques ambitieuses,
- pas trop grande : les villes sont des systèmes très intégrés, dans lesquels les différents réseaux (d'eau, d'électricité, de transport), le tissu économique et les séparations sociales, sont imbriqués et fonctionnent ensemble.

Il apparaît de là assez judicieux de vouloir mettre en cohérence les politiques urbaines afin de limiter les atteintes aux sols et garantir le maintien et/ou l'augmentation des fonctions qu'ils assurent. Un préalable étant de bien connaître ces sols (caractérisation, fonctions, etc.) à l'échelle urbaine pour en hiérarchiser l'usage en planification par exemple.

De façon générale, on distingue 4 grandes catégories de politiques urbaines d'adaptation :

- les modifications de l'occupation des sols et la planification urbaine (par exemple pour éviter les développements nouveaux dans les zones inondables),
- les investissements directs et notamment dans les ouvrages de protection et les infrastructures de gestion de l'eau,
- l'adaptation du cadre bâti, par action directe (investissement) ou indirecte (incitation fiscale et réglementaire),
- l'augmentation de la résilience de la zone, par la diversification économique ou des outils d'aide aux ménages et aux entreprises en cas d'impacts.

A cela, viennent s'ajouter des mesures réglementaires, légales et financières, d'instruction ou incitatives en faveur de telle ou telle action.

En pratique, il est fortement recommandé d'intégrer l'adaptation et la préservation des sols dans tous les programmes de l'agglomération et de veiller en particulier à favoriser la transversalité des mesures. Pour un impact donné ou une fonction des sols à préserver, plusieurs types de mesures d'adaptation peuvent être mises en œuvre. Il est utile de :

- **développer des critères de sélection** pouvant concerner par exemple :
 - ✓ le caractère « sans regret » des mesures,
 - ✓ l'acceptabilité des mesures pour différents types d'acteurs locaux,
 - ✓ le coût et la facilité de mise en œuvre,
 - ✓ la flexibilité des mesures, leur adaptabilité, leur synergie avec les autres objectifs de développement, notamment en matière d'atténuation.

- **sensibiliser au préalable les populations** et/ou prévoir une incitation financière auprès des particuliers pour encourager la mise en œuvre des actions,
- utiliser des outils pour **identifier** les mesures d'adaptation et **décider** celles qu'il convient de mettre en œuvre en priorité, et pour **évaluer** leur efficacité a posteriori,
- enfin, organiser un **suivi de l'efficacité** de la stratégie mise en place et **partager les résultats** avec les acteurs locaux et les populations.

4.2.3 Les documents de planification comme outils d'action

Les collectivités ont un rôle important à jouer à travers notamment leurs documents de planification comme les SRADDET, les SCOT, les PLU(i), les PCAET et les SDAGE/SAGE en matière de gestion économe de l'espace et d'adaptation au changement climatique.

A l'échelle régionale, le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (**SRADDET**) donne les orientations stratégiques. La transition écologique et l'adaptation au changement climatique sont des thèmes transversaux déterminants des SRADDET et concernent notamment la gestion économe des ressources et du foncier et la lutte contre la consommation d'espaces agricoles, naturels et forestiers.

Les objectifs du **SRADDET** s'imposent aux documents locaux d'urbanisme (SCoT et, à défaut, plans locaux d'urbanisme, cartes communales, plans de déplacements urbains, plans climat-air-énergie territoriaux et chartes de parcs naturels régionaux) dans un rapport de prise en compte.

La loi Climat et Résilience promulguée en 2021²⁷ introduit l'objectif programmatique de réduction par deux du rythme d'artificialisation des sols sur les dix prochaines années (2021-2031) par rapport à la décennie précédente avant d'atteindre en 2050 l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) ; ces objectifs doivent être traduits dans différents documents de planification :

- ✓ à l'échelle régionale par le SRADDET, qui fixe des objectifs territorialisés,
- ✓ le SCoT qui introduit des critères pour l'ouverture à l'urbanisation des espaces NAF,
- ✓ le PLU qui ne peut prévoir l'ouverture à l'urbanisation qu'en ayant justifié qu'il n'y a pas de réserve foncière déjà urbanisée et peut encadrer l'imperméabilisation et la désimperméabilisation.

Le texte de loi qui porte la réduction de l'artificialisation met en avant le sol et les fonctions qu'il exerce. Elle définit qu'« un sol est regardé comme artificialisé si l'occupation ou l'usage qui en est fait affectent durablement tout ou partie de ses fonctions écologiques, en particulier ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques ainsi que son potentiel agronomique».

Le **Plan Climat Air-Énergie Territorial (PCAET)** contribue à l'adaptation des territoires au changement climatique. Ce plan comporte des mesures spécifiques à l'atténuation du changement climatique comme la préservation des stocks de carbone présents dans les sols et la végétation. Le PCAET doit également disposer d'un volet sur l'adaptation qui peut contenir des mesures visant à préserver l'agriculture dans un contexte de changement climatique mais également les sols. Des mesures sur la réduction de l'îlot de chaleur urbain peuvent également être introduites dans ce document.

²⁷ LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets

Le PCAET doit prendre en compte dans son élaboration le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) et intégrer des dispositions relatives à un urbanisme respectueux de l'usage des sols (consommation d'espace, respect de l'armature urbaine, mobilités, ...).

Obligatoire dès 2017 pour les intercommunalités de plus de 50 000 habitants, et à l'ensemble des intercommunalités de plus de 20 000 habitants depuis le 1er janvier 2019, le contenu du PCAET est fixé par la loi ; s'il peut être de nature assez différente en fonction de l'engagement des collectivités concernées, celles-ci sont invitées à suivre une démarche commune : poser un diagnostic, élaborer une stratégie territoriale, définir un plan d'actions, et un dispositif de suivi et d'évaluation des mesures initiées, et par conséquent à se poser la question des sols et de l'impact du changement climatique à différentes échelles, les conduisant à interroger le rôle des sols au-delà même de l'écosystème urbain.

Le **Plan Local d'Urbanisme communal (PLU) ou intercommunal (PLUi)** peut également contribuer à limiter l'étalement urbain et à préserver des espaces de pleine terre. En effet, le règlement écrit du PLU peut déterminer, sous forme d'un pourcentage ou d'un coefficient (coefficient pleine terre ou de biotope par exemple), la surface minimale d'espaces libres à maintenir sur chaque terrain à l'occasion d'opérations de construction ou d'aménagement.

De même, il est possible pour le règlement du PLU d'imposer qu'une part des abords des constructions ou aménagements demeure en pleine terre afin de favoriser la végétalisation mais aussi de favoriser la rétention des eaux pluviales et de ruissellement.

L'article R.151-43 du code de l'urbanisme énonce que le « [règlement peut [...]] Imposer des obligations en matière de réalisation [...] de plantations [...] ». Ces obligations peuvent être énoncées de manière qualitative et assez générale en indiquant que les espaces libres non nécessaires aux circulations et au stationnement doivent être aménagés en espace verts ou quantitative au moyen d'un pourcentage, ou d'une surface minimale à dédier aux espaces verts²⁸).

Afin de garantir la pérennité des espaces verts, l'article 13 peut poser des exigences quant aux caractéristiques du sol (épaisseur de couche de terre végétale, nature des végétaux...).

Le règlement du PLU peut également imposer la préservation ou la plantation d'arbres avec des caractéristiques concernant le sol de ces plantations : exigence d'une plantation « en pleine terre par exemple » assortie d'une surface minimale par arbre. Il peut également introduire des obligations quant à la taille des arbres et les espèces admises ou interdites.

4.3 Des exemples d'actions en milieu urbain et péri-urbain

Le présent chapitre propose des exemples de mesures, **sous forme de fiches pédagogiques**, permettant d'orienter l'action des villes en matière de préservation des sols et de leurs fonctions au regard des impacts du changement climatique en zone urbaine et péri-urbaine.

La volonté est ici de fournir des orientations possibles pour la mise en œuvre d'actions concrètes à visée opérationnelle. Les mesures proposées sont évoquées **en fonction de l'échelle** à laquelle elles s'appliquent préférentiellement, une mesure pouvant néanmoins trouver écho ou être déclinée à 2 ou 3 échelles différentes selon les moyens de mise en œuvre choisis ou dans une logique de temporalité échelonnée.

²⁸ Cf. par exemple la fiche « Traitement environnemental et paysager des espaces non bâtis et abords des constructions / Fiche 3 / Sous-fiche 3 / Ecriture du PLU » du Gridauh (<https://www.gridauh.fr/sites/default/files/u440/Traitement%20environnemental%20Sous-fiche%203.pdf>)

A noter que toutes ces mesures ne sont pas des solutions clés en main et nécessitent d'être contextualisées en fonction du territoire (enjeux, caractéristiques des sols, ...).

Le tableau ci-dessous recense les mesures proposées et fournit un repérage des fonctions des sols qu'elles visent à protéger ou redévelopper sur le territoire urbain, une même mesure touchant le plus souvent plusieurs volets des services rendus par les sols en ville.

N° Fiche	Intitulé	Echelle	Principales fonctions des sols favorisées
1	Caractériser la qualité des sols en lien avec leur multifonctionnalité : exemple du projet MUSE	Planification Commune Projet	Toutes
2	Intégrer les milieux humides dans l'aménagement urbain	Planification Commune	Toutes
3	Mise en place de toitures végétalisées	Planification Commune Projet	Régulation du cycle de l'eau Support de vie – cadre de vie
4	Élaborer une trame brune, « réseau écologique » pour la biodiversité du sol	Planification Commune	Toutes
5	Bonnes pratiques de gestion des sols pour en maintenir la fertilité en milieu urbain	Commune	Toutes
6	Limiter la prolifération d'espèces invasives et/ ou pathogènes dans les sols	Commune Projet	Support de production végétale Réservoir de biodiversité
7	Limiter la vulnérabilité des sols urbains aux phénomènes de sécheresse	Commune	Régulation du cycle de l'eau
8	Végétaliser les espaces urbains et péri-urbains (arbres, haies, buissons)	Commune Projet	Toutes
9	Aménagement de l'espace urbain pour des usages spécifiques (allée piétonne, piste cyclable, ...) permettant l'infiltration des eaux	Projet	Régulation du cycle de l'eau Stabilisation, épuration, filtration et transformation des nutriments et polluants
10	Gérer les eaux pluviales urbaines par des techniques alternatives au « tout tuyau » (noues d'infiltration, parking végétalisés, toitures végétalisées, etc.)	Planification Commune Projet	Toutes
11	Développer l'agriculture urbaine	Planification Commune Projet	Toutes
12	Phyto-management des sols en friches et/ou des terres excavées	Projet	Régulation du cycle de l'eau Stabilisation, épuration, filtration et transformation des nutriments et polluants
13	Favoriser la renaturation de sols dégradés	Projet	Toutes

Si certaines des orientations d'actions sont spécifiques, la majorité des mesures et outils recensés s'appuient sur les principes essentiels pour l'action en faveur des sols en ville à savoir :

- éviter l'artificialisation (densification douce, logements vacants, .. ;)
- limiter l'artificialisation,
- limiter l'imperméabilisation et réduire les emprises au sol,
- désimperméabiliser et renaturer les espaces urbains ;

Ces principes servent de guides qu'il est ensuite intéressant de décliner aux différentes échelles et avec des actions adaptées.

A l'instar des recommandations produites par l'Ademe en 2015 sous forme de recueil de fiches²⁹, ainsi que du « Guide pratique pour limiter l'artificialisation des sols » du ministère de la transition écologique³⁰, les outils présentés ici se veulent d'application pratique et opérationnelle. Ils ciblent les décideurs locaux pour les aider dans leur action en faveur de la préservation des sols en milieu urbain.

Les mesures ont vocation à être croisées et combinées dans une logique de stratégie coordonnée de façon à prendre en compte dès maintenant les impacts du changement climatique sur les sols et se nourrir des outils nécessaires pour prévoir et anticiper les évolutions futures.

Il y a en effet un intérêt majeur à combiner les actions à différentes échelles spatiales et temporelles. De même qu'il apparaît essentiel également de privilégier la concertation pour mener des démarches partagées et construire ensemble la ville de demain, plus protectrice de la vie des habitants et plus respectueuse des sols.

4.3.1 A l'échelle de la planification

A l'échelle intercommunale, l'objectif principal est d'adapter les documents de planification afin d'élaborer un plan rationnel d'utilisation des sols pour :

- Identifier et préserver les sols de qualité en capacité de répondre au plus grand nombre de besoins présents et à venir,
- Intégrer la compréhension des facteurs de vulnérabilité des sols au changement climatique,
- Inciter effectivement à un aménagement dense et à usage multiple dans les zones résilientes, de façon à limiter l'étalement urbain diffus et discontinu qui constitue une source majeure d'artificialisation des sols et qui consomme souvent des sols de qualité, au voisinage d'agglomérations, et dont on risque de manquer dans le cadre d'une agriculture de proximité,
- Suivre des méthodes de planification écologique par de-là même des limites de la ville (par exemple gestion du bassin versant dans les villages à la périphérie d'une ville, protection des zones humides sur le territoire voisin).

Un plan territorial, qu'il porte sur l'urbanisme, la biodiversité, les déchets, l'assainissement, les énergies, etc., est le premier geste de la collectivité pour impulser une politique en faveur de la préservation des sols permettant d'intégrer cette composante dans sa politique d'adaptation au changement climatique.

29 Adaptation au changement climatique - 12 Fiches pour agir dans les collectivités locales. Ademe, 2015. Cf. <https://www.adaptation-changement-climatique.fr/centre-ressources/12-fiches-sur-ladaptation-au-changement-climatique-dans-les-collectivites-locales>

30 Guide pratique pour limiter l'artificialisation des sols. Ministère de la transition écologique. 2021. Cf. <https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/bibliographie/guide-pratique-limiter-artificialisation-sols-sobriete-fonciere>

Caractériser la qualité des sols en lien avec leur multifonctionnalité : exemple du projet MUSE

Fiche 1

Échelle :

Planification

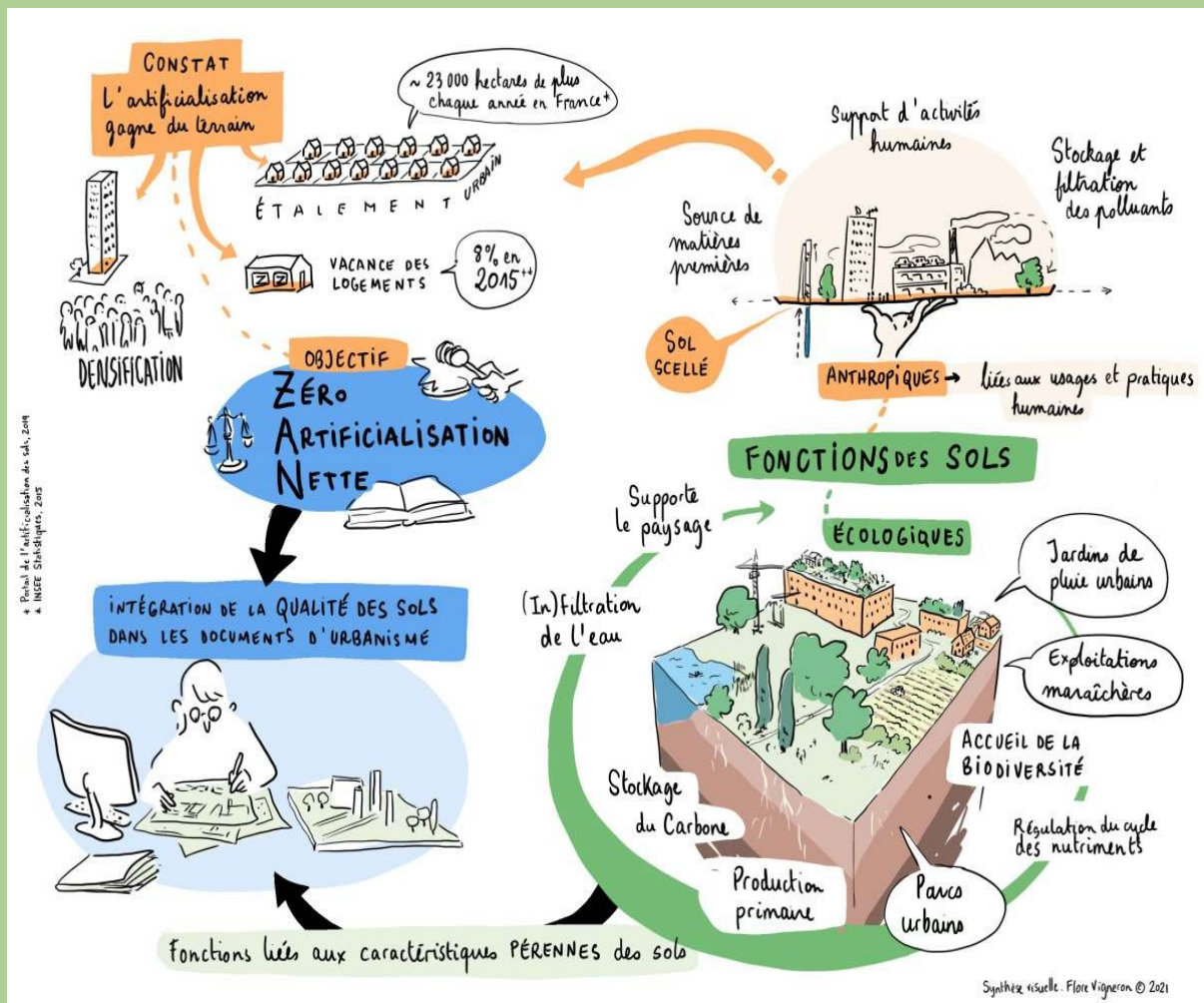
Fonctions des sols favorisées :

Toutes

Une étude récente a permis de caractériser les sols sur la base de leurs propriétés et fonctionnement, à l'échelle supra communale, ceci afin d'identifier et de préserver les sols de qualités en capacité de répondre au plus grand nombre de besoins présents et à venir.

Il s'agit du projet MUSE piloté par le Cerema et regroupant divers acteurs publics (Université de Marseille, IFSTTAR, BRGM, INRAE, CEREGE, Chambre d'agriculture de l'Indre). Débuté fin 2017 pour une durée de 3 ans, le projet MUSE (« Intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme ») avait pour objectif de développer une méthodologie permettant de caractériser la qualité des sols d'un territoire et de la cartographier. Ceci afin de permettre aux collectivités en charge d'élaborer un document d'urbanisme supra-communal, et en particulier celles en charge de plans locaux d'urbanisme intercommunaux (PLUi) et des Schémas de Cohérence des Territoires (SCoT), d'intégrer la qualité des sols dans leur réflexion et d'adapter leur projet de territoire à l'usage qui peut être fait de ces derniers. Une des finalités du projet est de protéger de l'urbanisation les sols en capacité de rendre le plus grand nombre de services.

La méthodologie produite permet d'accompagner les collectivités dans les phases de diagnostic de territoire, de construction du projet d'aménagement (incluant éventuellement la mise en place de mesures d'évitement, de réduction et/ou compensatoires) et, si le document d'urbanisme y est soumis, tout au long de la démarche d'évaluation environnementale du projet. Il permet aussi de suivre les effets, à travers des indicateurs de fonctions des sols.



Intégrer la qualité des sols dans les documents d'urbanisme – MUSE (Flore Vigneron)

Sources :

Branchu P., Marseille, F., Béchet B., Bessière J.-P., Boithias L., Duvigneau C., Genesco P., Keller C., Lambert M.-L., Laroche B., Le Guern C., Lemot A., Métois R., Moulin J. Néel C., Sheriff R. (2022). MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 184 pages.

<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5415-muse-integrer-la-multifonctionnalite-des-sols-dans-les-documents-d-urbanisme.html>

Pour aller plus loin :

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/prendre-compte-multifonctionnalite-sols-amenagement?folder=4232>

Intégrer les milieux humides dans l'aménagement urbain

Échelle :

Planification

Commune

Fonctions des sols favorisées :

Toutes

Les milieux humides sont parmi les espaces naturels les plus riches et précieux au monde. Qu'ils soient en eau en permanence ou par intermittence, ces milieux sont d'une grande diversité ; ils abritent des plantes aquatiques, roseaux, iris, joncs, etc. et des animaux tels que grenouilles, oiseaux, insectes qui trouvent dans ces espaces les conditions nécessaires pour y vivre et se reproduire.

Le territoire urbain est concerné par une large gamme de milieux humides : des prairies humides riches en biodiversité, des mares restaurées ou créées, des étendues d'eau vastes et calmes, des marais remis en valeur. Ces milieux jouent un rôle essentiel en faveur de l'environnement et favorisent la biodiversité du territoire. Ils sont un lieu de vie ou d'abri pour la faune, un lieu de reproduction, de nidification pour les oiseaux, ils offrent des conditions propices au développement d'une végétation riche et constituent un maillon de la trame verte et bleue.

Les milieux humides améliorent également l'environnement urbain apportant des bénéfices pour la population en terme de cadre de vie : prévention des inondations, amélioration de la qualité des eaux, gestion des eaux pluviales, apport de fraîcheur, soutien à l'étiage, etc.

Comment se lancer dans un projet de création ou de restauration de milieux humides en milieu urbain ?

Une démarche active de préservation : Il est d'abord important de préserver les milieux existants, notamment au travers de :

- leur prise en compte dans la planification : la spécificité des milieux humides peut se traduire au travers du zonage Nh, des orientations d'aménagement et des prescriptions associées ; par exemple, ces dernières doivent garantir un accès à la source permettant l'alimentation en eau des milieux humides.
- leur préservation foncière via l'acquisition des terrains.

Le montage d'un projet de restauration ou de création de milieux humides : le fonctionnement naturel des milieux humides doit être pris en compte dès la genèse du projet. Il convient également de bien identifier le contexte environnemental : réseau hydraulique, habitats et espèces remarquables et le contexte urbain (dense, périurbain).

Les clés de la réussite supposent de :

- fixer dès le départ l'ensemble des objectifs du projet en privilégiant leur transversalité : intégration paysagère, réservoir de biodiversité, espace tampon, ouverture au public,
- privilégier une maîtrise d'œuvre élargie : hydrauliciens, paysagistes et écologues,

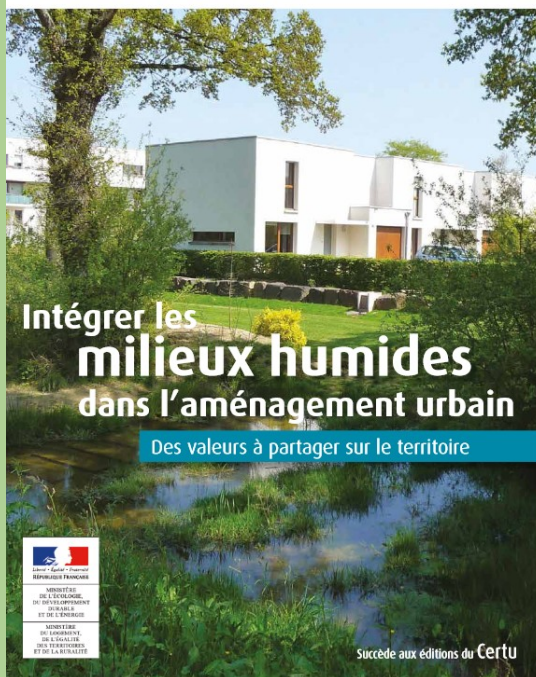
- anticiper les futurs usages du milieu : conciliation des usages, accessibilité de l'espace,
- anticiper la gestion : fauchage tardif, absence d'usage des phytosanitaires, éco-pâturage.

Il est ensuite important de communiquer, d'associer la population riveraine en tant qu'acteur de préservation du milieu, et de former les équipes en charge de l'entretien de ces espaces.

De nombreuses actions concrètes sont possibles et existent déjà pour valoriser les milieux humides en territoire urbain :

- Restaurer un milieu humide asséché par l'urbanisation dans l'optique de gérer les eaux pluviales,
- Réhabiliter un milieu humide à l'abandon afin de créer un réservoir de biodiversité,
- Créer des milieux humides afin de mettre en valeur le parcours de l'eau en ville,
- Rendre aux cours d'eau leurs espaces de divagation afin de se protéger des inondations.

Des informations complémentaires sur les acteurs pour le montage des projets, le financement, la mise en œuvre, sont disponibles sur le guide édité par le Cerema.



Guide Cerema : intégrer les milieux humides dans l'aménagement urbain



Crédit photo : Laurent Mignaux / Terra

Sources :

Intégrer les milieux humides dans l'aménagement urbain
- Des valeurs à partager sur le territoire, Réf. Cerema PL00115.

Pour aller plus loin :

Milieux humides et aménagements urbains, Cerema, 2015, 240 p

<https://www.ecologie.gouv.fr/milieux-humides-des-villes-durables-et-agreables-vivre>

Mise en place de toitures végétalisées

Échelle :

Planification

Commune

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Régulation de l'eau : stockage et réserve d'eau, infiltration

Support de vie

Très répandue en Allemagne, en Suisse, en Amérique du Nord et au Japon, la toiture végétalisée se développe depuis une dizaine d'année en France. Les techniques de toitures végétalisées consistent à créer un « néo-sol » plus ou moins épais, à base de substrat, permettant de retrouver une partie des fonctions assurées par les sols.

On distingue trois types de végétalisation selon l'épaisseur de substrat et le type de végétaux utilisés : extensive, semi-intensive et intensive.

- **La végétalisation extensive** consiste à créer un écosystème sur un complexe de culture élaboré de faible épaisseur (3 à 7 cm environ), permettant la réalisation d'un couvert végétal permanent (couvre-sols rustiques, mousses et sédums...).
- **La végétalisation semi-intensive** utilise un complexe de culture élaboré, d'épaisseur moyenne (15 cm). Ce type de culture peut mélanger les couvre-sols, les plantes à fleurs ou à feuillage, les légumes et même de petits arbustes ou des grimpants comme la vigne vierge ou le chèvrefeuille. Le substrat d'une culture semi-extensive est généralement composé d'environ 50% d'agréats poreux.
- Enfin, **la végétalisation intensive** est une véritable toiture-terrace jardin, préconisée pour les petites et moyennes surfaces. La culture se fait dans des bacs pouvant faire jusqu'à 1 ou 2 mètres de profondeur, l'épaisseur du substrat étant plus importante (15 à 30 cm environ).

De nombreuses études soulignent les bienfaits de la végétalisation du bâti en ville. S'ils sont souvent difficiles à quantifier, ces bienfaits se concrétisent à différentes échelles (du bâtiment lui-même, du quartier, de la ville, etc.) et dans différents domaines (gestion de l'eau, énergie, cadre de vie, social, biodiversité, etc.). Outre le confort thermique et acoustique des bâtiments, les toitures végétalisées, à l'instar des sols urbains végétalisés, participent à l'amélioration de la qualité de l'air, permettent de réduire le phénomène d'îlots de chaleur, jouent un rôle très intéressant en matière de régulation des eaux de pluie, et interviennent dans la préservation de la biodiversité et la continuité écologique en ville.

Comme tout ce qui relève de l'aspect extérieur des constructions, la végétalisation d'une toiture doit faire l'objet d'une demande d'urbanisme (Déclaration Préalable en cas de bâtiment existant, Permis de construire en cas de surélévation d'un bâtiment existant ou de bâtiment neuf), et respecter les règles d'urbanisme en vigueur définies par le Plan Local d'Urbanisme (PLU) de la ville.

Une ville peut renforcer dans son PLU les obligations de végétalisation des espaces libres au sol mais aussi encourager la végétalisation des toitures et l'agriculture urbaine en intégrant les adaptations réglementaires nécessaires pour garantir la qualité et la pérennité des projets de végétalisation mis en œuvre, tout en diversifiant les strates végétales et en favorisant la biodiversité.



Source : Maison & travaux

Source : ARB - île de France



Sources :

« Guide (et plate-forme collaborative) des toitures végétalisées et cultivées – Toutes les étapes pour un projet de qualité », Mairie de Paris, décembre 2017, 102p,

« Guide de végétalisation des toitures », Euro-métropole de Strasbourg, 2017, 12p,

« Étude pour la définition d'une démarche de développement des toitures végétalisées », Nice Côte d'Azur, Direction de l'Environnement, 2009, 42p,

Yann Dusza. « Toitures végétalisées et services écosystémiques: favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale ». Ecologie, Environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017. Français. NNT: 2017PA066033. tel-01587757

Pour aller plus loin :

<https://www.sortirdunucleaire.org/Toitures-vegetalisees-resolument>

M. Barra, H. Johan (coord)., Écologie des toitures végétalisées. Synthèse de l'étude GROOVES (Green roofs verified ecosystem services). 2021, 92p.

Élaborer une trame brune, « réseau écologique » pour la biodiversité du sol

Échelle :**Planification****Commune****Fonctions des sols favorisées :****Toutes**

Les sols constituent un habitat pour de nombreux groupes biologiques. La « trame brune » est une expression basée sur le modèle des trames verte et bleue, appliquée à la continuité des sols. Il y a dans l'expression « trame brune » une notion essentielle de connectivité car les espèces présentes dans le sol ont des besoins de déplacements pour accomplir leur cycle de vie, se reproduire, échapper à des changements ponctuels dans leur environnement, recoloniser un milieu après un épisode de mortalité, etc., et plus les populations sont isolées, plus elles sont vulnérables (perte de diversité génétique, risque de disparition locale...).

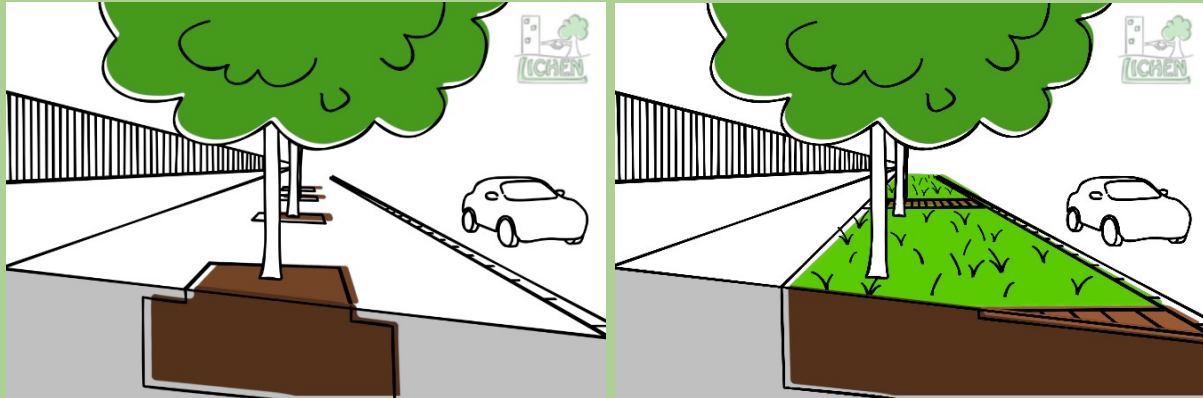
En ville, ces déplacements sont susceptibles de se heurter à de nombreux obstacles souterrains d'origine anthropique : fondation des habitations, réseau de transport d'énergie ou de personnes.

À une échelle plus macroscopique, les arbres et arbustes profitent également de cette continuité en échangeant de nombreux nutriments, via leurs racines et leurs partenaires champignons. Des arbres isolés chacun dans leur fosse seront plus fragiles et vulnérables aux aléas (climat, pathogènes, blessures physiques...), tandis que s'ils partagent un volume de sol commun, le système dans son ensemble pourra compenser les carences des uns et des autres et contribuer au bon développement de chacun.

Il est donc important de réfléchir au maintien d'espaces de pleine terre, aussi continus ou interconnectés que possible, au sein des villes afin de préserver une continuité écologique dans le sol, en complément de la continuité écologique en surface.

Si l'artificialisation des sols est souvent inévitable, il est possible dans de nombreux cas de la réduire et de minimiser l'isolement des portions de sol maintenues, par exemple en organisant différemment le stationnement, les réseaux ou les aménagements piétons.

Il s'agit de construire la ville en tenant compte des enjeux de la protection et du développement de la biodiversité des sols, à travers le développement de « trames brunes » comme véritables continuités de sols vivants afin de rendre la ville plus résiliente.



Sources :

<https://www.sfecologie.org/regard/r72-mai-2017-r-sordello-corridors-ecologiques/>

<https://agencelichen.wordpress.com/2016/09/21/trame-brune/>

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/desimpermeabilisation-renaturation-sols>

Pour aller plus loin :

http://capitale-biodiversite.fr/sites/default/files/rapports/rapport_visite_2017_lille.pdf

<http://www.capitale-biodiversite.fr/experiences/phase-operationnelle-de-letude-des-reseaux-ecologique-pour-la-mise-en-oeuvre-de-la-trame>

4.3.2 A l'échelle de la commune

A l'échelle communale, les services et décideurs privés et publics intervenant directement dans l'aménagement en milieu urbain ou rural ont un rôle majeur à jouer pour un territoire respectueux des sols et de leurs fonctions.

Cette échelle permet la mise en œuvre des politiques visant à préserver la naturalité des sols et conserver leur richesse biologique. La végétalisation des espaces urbains et péri-urbains notamment, associée à de bonnes pratiques de gestion des sols pour en maintenir la fertilité, limiter la prolifération d'espèces invasives et/ou pathogènes, et limiter leur vulnérabilité aux phénomènes de sécheresse, préserve la biodiversité de ces milieux, facilite l'évapotranspiration et recrée de la fraîcheur en ville.

Les jardins et espaces végétalisés concourent en outre, à leur échelle, à la régulation du cycle de l'eau considérant que la structure des sols, leur porosité et leur couverture végétale favorisent l'infiltration et le stockage de l'eau dans l'espace urbain.

Bonnes pratiques de gestion des sols pour en maintenir la fertilité en milieu urbain

Échelle :

Commune

Fonctions des sols favorisées :

Toutes

Gérer la fertilité des sols et développer des systèmes de production durables sont deux préoccupations essentielles en agriculture. Ces préoccupations trouvent également tout leur sens en milieu urbain, où la gestion des sols des espaces verts doit également permettre le maintien voire l'amélioration de la fertilité des sols mais aussi prévenir l'érosion et le tassement.

S'intéresser au maintien de la fertilité des sols revient à garantir :

- une profondeur de sol suffisante pour le développement du système racinaire et la réserve utile,
- un bon drainage, permettant une aération du sol suffisante pour le prélèvement racinaire,
- une quantité adaptée de matière organique,
- un pH adapté aux besoins des plantes, généralement situé entre 5,5 et 7,0,
- une concentration suffisante en nutriments sous des formes assimilables,
- la présence de micro-organismes favorables au développement des plantes.

Une gestion respectueuse des espaces verts et la mise en œuvre de bonnes pratiques par les communes permettent d'assurer la fertilité des sols en ville, en particulier :

- **l'amendement des sols** : apport d'un produit destiné à augmenter la fertilité des sols en améliorant leur pH (chaux, nitrate d'ammonium), leur structure (sable, vermiculite) ou leurs éléments nutritifs (compost, cendres de bois),
 - Compostage : amendement et fertilisant par excellence, le compost ensemence le sol en micro-organismes à qui il sert d'abri et de nourriture, il améliore la structure du sol, il équilibre le pH et fournit les éléments nutritifs essentiels aux végétaux,
 - Chaulage : la chaux est utilisée pour réduire l'acidité des sols qui affecte la disponibilité des éléments nutritifs. Un pH inadéquat nuit également à la stabilité structurale du sol, favorise les maladies fongiques et représente une menace à la survie de plusieurs organismes bénéfiques.
- la suppression des engrais chimiques et l'**utilisation d'engrais organiques** qui en préservant la qualité du sol favorisent indirectement une meilleure résistance des plantes dans leur milieu,
- **la suppression des herbicides et insecticides** : utiliser des méthodes alternatives (désherbage thermique, paillage des massifs arbustifs, désherbage manuel) et privilégier l'usage de traitements biologiques qui préservent les insectes.
- **l'utilisation du « mulching »**, opération qui permet de laisser les déchets de tonte fine-

ment hachés sur le terrain et qui présente de nombreux avantages en termes de développement durable (fertilisation naturelle du sol par la décomposition rapide des micro-organismes, pas de déchets de tonte à éliminer, maintien du taux d'humidité dans le sol,

- **la fauche tardive** qui consiste à reculer la date de tonte des pelouses ou des talus après l'arrivée à terme d'une végétation composée de graminées et de fleurs, qui respecte le cycle de reproduction de la prairie, facilite la reconstruction de la chaîne alimentaire et respecte l'équilibre naturel du sol,
- **le paillage**, technique qui consiste à recouvrir le sol de matériaux organiques ou minéraux pour le nourrir et/ou le protéger. Il permet de garder l'humidité du sol, de diminuer l'apparition de mauvaises herbes, d'apporter des éléments nutritifs au sol.

La mise en œuvre de ces mesures au niveau communal peut s'accompagner d'une information et d'une sensibilisation des habitants permettant d'étendre ces bonnes pratiques à la gestion des sols des espaces verts et jardins privés.



Exemple de paillage d'un sol



Exemple de mulching

Sources :

<https://www.albertville.fr/10-environnement-et-developpement-durable/espaces-verts-preservation-nature/>

<http://espacepourelavie.ca/structure-et-fertilite-du-sol>

Pour aller plus loin :

« Guide de bonnes pratiques d'aménagement urbain, Création et gestion d'espaces verts », Ville de Namur, avril 2016.

Fiche 6

Limiter la prolifération d'espèces invasives et/ou pathogènes dans les sols

Échelle :

Commune

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Support de production végétales

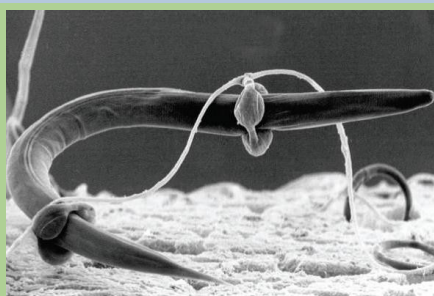
Réservoir de biodiversité

La biodiversité des sols héberge de nombreux organismes dont certains dits « régulateurs » (nématodes, collemboles, acariens...) contrôlent la dynamique et l'activité des microorganismes du sol. La présence d'une diversité de prédateurs permet, entre autre, de limiter naturellement la prolifération de certains champignons ou bactéries pathogènes des cultures. Avoir une importante biodiversité du sol en terme d'abondance et de diversité, c'est augmenter la probabilité que les sols hébergent un ennemi des maladies des cultures.

Ainsi, mettre en œuvre des mesures qui favorisent la diversité des organismes du sol concourent à limiter la prolifération d'espèces invasives et/ ou pathogènes dans les sols, comme :

- Augmenter la teneur en matière organique du sol afin de permettre le développement d'une communauté saine d'organismes ;
- Réduire au maximum les intrants agro-chimiques et la contamination des sols afin de limiter des modifications de la biodiversité ;
- Prévenir le tassement du sol par la présence d'une couverture végétale ou de résidus de culture et en évitant de faire circuler des engins lorsque les sols sont humides donc moins portant.

L'ensemble de ces mesures sont à la base de l'agro-écologie, ensemble de pratiques agricoles qui s'appuient sur les écosystèmes et leur fonctionnement, et permettent de réduire les pressions environnementales. Il s'agit d'utiliser au maximum la nature comme facteur de production en maintenant ses capacités de renouvellement.



Le champignon carnivore *Drechlerella anchonia*, qui capture un nématode - G. Barron/N. Allin (source : European atlas of soil biodiversity)

Sources :

[Eglin T., Blanchart E., Berthelin J., de Cara S., Grolleau G., Lavelle P., Richaume-Jolion A., Bardy M., Bispo A. 2010. La vie cachée des sols, MEDDTL, 20pp](#)

Pour aller plus loin :

<https://agriculture.gouv.fr/agriculture-et-foret/projet-agro-ecologique>

Limiter la vulnérabilité des sols urbains aux phénomènes de sécheresses

Échelle :

Commune

Fonctions des sols favorisées :

Infiltration des eaux de pluviales

Le changement climatique est susceptible de conduire à une augmentation de la fréquence et de la sévérité des sécheresses dans les décennies à venir. Les sécheresses sont cependant difficiles à prévoir. Contrairement aux événements climatiques soudains, le phénomène de sécheresse est très progressif. Un suivi de situation hydrologique globale réalisé par le ministère chargé de l'environnement, avec la contribution de nombreux partenaires (Météo France, BRGM, AFB, etc.) permet d'avoir une vision globale de la sécheresse des sols, ainsi que du niveau d'eau des nappes et des milieux aquatiques.

Le principal levier d'action est l'encadrement des prélèvements d'eau, mais il est aussi possible de favoriser les capacités naturelles des milieux à retenir l'eau et en particulier celles des sols non imperméabilisés et non tassés en milieu urbain.

Plusieurs mesures sont ainsi possibles pour limiter la sécheresse des sols en ville :

- planter des arbres et créer des zones humides et des espaces verts,
- faire pousser des plantes qui se protègent entre elles,
- préserver les sols en reconstituant leur taux de matière organique,
- réutiliser les eaux usées comme solution pour préserver la réserve en eau,
- engager une politique de communication auprès des habitants, pour inciter à économiser l'eau et donc à limiter la sécheresse.

La réglementation relative à la sécheresse concerne essentiellement les prélèvements d'eau, puisque c'est le principal facteur qui peut être contrôlé. Elle repose sur un encadrement des prélèvements qui peuvent être soumis à autorisation selon les volumes prélevés. En cas de sécheresse hydrologique, peuvent s'ajouter des restrictions temporaires des usages de l'eau, déclenchées par le préfet à l'échelle du département (par arrêté préfectoral). Les arrêtés sécheresse ne peuvent être prescrits que pour une durée limitée, sur un périmètre déterminé, pour assurer l'exercice des usages prioritaires, plus particulièrement la santé, la sécurité civile.

Vu sous l'angle des sols, les arrêtés sécheresse impactent surtout l'activité agricole, aucune restriction ne concernant directement l'usage des sols en milieu urbain.

Les moyens de préserver les sols urbains de la sécheresse s'inscrivent tout au long de l'année dans le cadre de pratiques et d'usages régulier, d'actions facilitées par les communes pour l'aménagement de l'espace urbain favorisant la préservation des fonctions des sols, le développement des espaces verts, etc. C'est cet ensemble de mesures et d'actions conjuguées qui permettent de diminuer la vulnérabilité des sols urbains aux phénomènes de sécheresse à long terme.



Un exemple de sol asséché –
battance des sols

Sources :

<https://www.eaufrance.fr/anticiper-la-secheresse-et-sadapter-ses-consequences>

Pour aller plus loin :

4.3.3 A l'échelle du projet d'aménagement

A l'échelle du projet, il s'agit de préserver les sols les plus fonctionnels en recherchant la meilleure adéquation entre caractéristiques des sols et usage.

Globalement, l'objectif est de limiter l'emprise au sol dans l'aménagement et l'urbanisme et, quand cela n'est pas possible, de privilégier la perméabilité des solutions, par l'usage de matériaux drainants pour les parkings extérieurs par exemple, ou de réseaux d'assainissement qui favorisent l'infiltration à la parcelle au moyen de noues végétalisées ou de systèmes de récupération des eaux d'écoulement.

La désimperméabilisation de certains espaces en milieu urbain, peut également permettre aux sols de remplir leur rôle d'infiltration lors d'événements climatiques extrêmes et de réduction de l'îlot de chaleur urbaine.

La réhabilitation des espaces vacants et des friches industrielles au sein des zones déjà urbanisées est un autre levier pour favoriser la renaturation des sols, l'enjeu crucial étant, à cette échelle, de préserver une part suffisante d'espaces non artificialisés dans le tissu urbain pour permettre aux sols d'assurer pleinement leur fonctionnalité.

Végétaliser les espaces urbains et péri-urbains (arbres, haies, buissons)

Échelle :

Commune

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Toutes

La végétalisation en milieu urbain et péri-urbain consiste soit en un processus naturel de résilience écologique passant soit par une re-colonisation spontanée de la flore dans des interstices de la ville soit par un processus volontaire de replantation de végétaux (parcs, jardins, cours, pieds d'arbre, trottoirs, agriculture urbaine, ...). Elle peut également être menée sur le bâti : végétalisation des toitures et des murs.

Dans un monde de plus en plus confronté à des phénomènes extrêmes de sécheresse et de fortes pluies, aggravés par un niveau de minéralisation souvent très important en ville, les espaces végétalisés apparaissent comme une des solutions d'adaptation au changement climatique au vu des multiples fonctions et services qu'ils assurent : production de biomasse, gestion des eaux pluviales, habitat pour la biodiversité des sols ou aérienne, lutte contre les îlots de chaleur... Néanmoins, pour assurer ces fonctions et services, la végétalisation doit se faire sur des sols en bonne santé. Sinon une étape de restauration des sols est alors nécessaire.

Dans certains cas, la végétalisation peut être précédée d'une désimperméabilisation. Il s'agit de retirer des surfaces minérales, « scellées », totalement imperméables, au bénéfice de surfaces perméables avec pour objectif de retrouver un sol fonctionnel dans lequel le développement d'une végétation sera possible. C'est le cas par exemple à Lyon, la réhabilitation de la rue Garibaldi a laissé une large part à la végétalisation de la rue en dé-bitumant une partie de l'espace initialement dédiée à la voiture puis en améliorant la qualité des sols afin de les végétaliser selon plusieurs strates et ainsi optimiser l'habitat pour une biodiversité urbaine améliorée.

Autres exemples : à Paris, à Montréal, Portland (mouvement « depave »).



Végétalisation de la rue de Garibaldi – Crédit photo : Grand Lyon



Sources :

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/desimpermeabilisation-renaturation-sols>

Pour aller plus loin :

<https://www.depave.org>

<https://cremtl.org>

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/20-vegetaliser-agir-pour-le-rafraichissement-urbain-9791029715655.html>

https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/411/des_solutions_vegetales_pour_la_vil/n:24

Aménagement de l'espace urbain pour des usages spécifiques (allée piétonne, piste cyclable, ...) permettant l'infiltration des eaux

Échelle :

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Régulation de l'eau : stockage et réserve d'eau, infiltration

Stabilisation, épuration, filtration et transformation des nutriments et polluants

Dans des secteurs où les usages nécessitent des sols stabilisés pour des usages spécifiques tels que des allées piétonnes, des pistes cyclables, des trottoirs, des accès bâtiments, des parkings VL, ..., des revêtements perméables ou poreux peuvent être mis en place afin de limiter au maximum l'imperméabilisation des sols. Ces revêtements permettent ainsi de conserver l'humidité du sol ; réduire le ruissellement, l'érosion, le risque d'inondations et les îlots de chaleur et limiter la compaction du sol.

De nombreux types de revêtements poreux existent en fonction des usages recherchés, en voici quelques-uns à titre d'exemple :

- Gravier : mise en place de graviers de même dimension afin d'empêcher la compaction du sol et de permettre à l'eau de circuler à travers le sol et de s'y infiltrer.
- Blocs, dalles à joints perméables : Interbloc, brique ou bloc de béton espacés par des joints en sable ou gravier fin (où l'herbe peut aussi pousser) qui permettent l'infiltration de l'eau.
- Béton poreux : Pavement de béton conventionnel, mais sans les particules fines (sable), ce qui permet à l'eau de le traverser. Il comprend de 15 % à 35 % d'espaces vides interconnectés. Les bactéries peuvent se loger dans les orifices que le sable et les petites particules boucheraient dans un béton habituel. Elles peuvent ainsi agir sur les contaminants et les dégrader.
- Dalles gazons – dalles pavés (ADOPTA) : Produits utilisés comme revêtement de surface perméable au niveau de parkings, entrées de garage, allées piétonnes... Elles peuvent être posées soit directement sur le sol support soit sur une structure réservoir. Elles assurent l'infiltration de l'eau de pluie sans ruissellement.

Gérer les risques de pollution

Des transferts de polluants peuvent apparaître ou s'aggraver lors de changements d'usage des sols, notamment en cas de désimperméabilisation. La question du risque sanitaire sera également à prendre en compte dans le cas de suspicion de pollution. Le guide « Présomption de pollution d'un sol – Des clés pour comprendre et agir » a pour objectif de permettre à toute personne préoccupée par une question de pollution de sols de trouver la démarche à mettre en place pour disposer d'éléments de réponse et de solutions à mettre en œuvre. Ce guide, lui permet également d'identifier les assistances possibles et de rédiger une commande auprès des experts qu'elle pourrait être amenée à faire intervenir.



Parking perméable végétalisé à
Villeneuve-le-roi - Crédit photo : Cerema

Sources :

<https://adopta.fr/>

<https://robvq.qc.ca/>

Pour aller plus loin :

Gérer les eaux pluviales urbaines par des techniques alternatives au « tout tuyau »

Échelle :**Planification****Commune****Projet d'aménagement****Fonctions des sols favorisées :****Toutes**

L'urbanisation modifie profondément l'occupation des sols. L'imperméabilisation de ces derniers accroît le ruissellement des eaux pluviales, au détriment de l'infiltration, voire de l'évapotranspiration. Ce déséquilibre augmente les risques d'inondation à l'aval et induit un transfert accru de polluants vers le milieu naturel et une diminution théorique de la recharge des nappes, phénomènes aggravés par les effets du changement climatique.

Pour limiter l'imperméabilisation de nouvelles surfaces et la dégradation des sols, le recours à des techniques dites alternatives au « tout tuyau » se développe de plus en plus, prôné par les différentes politiques publiques nationales (assainissement, gestion des eaux pluviales, biodiversité, etc.).

Les principaux objectifs des techniques alternatives mises en place à la source c'est-à-dire au plus près du lieu de production de ruissellement sont d'une part, le traitement des eaux et la régulation des débits vers les réseaux (par rétention) et d'autre part, la réduction des volumes s'écoulant vers l'aval (par infiltration/évapotranspiration). Le sol est ainsi au centre de ces systèmes en permettant la mise en œuvre de ces fonctions de filtration et d'infiltration des eaux de ruissellement. Un large panel de techniques alternatives à la gestion des eaux pluviales existe : noues, tranchées d'infiltration, bassins d'infiltration, toitures végétalisées, les jardins de pluie ou encore les parkings perméables.

Des associations comme l'ADOPTA ou le GRAIE par exemple ont mis en place des documents pédagogiques et techniques depuis de nombreuses années afin de permettre à chacun de mettre en place sur son territoire et en fonction des objectifs et des enjeux ce type de solutions.





Noue végétalisée à Villeneuve-la Garenne (92) - Crédit photo : Cerema



*Noue végétalisée à Saint-Denis (93)
- Crédit photo : Cerema*

Sources :

<http://www.graie.org/portail/>

<https://adopta.fr/>

Pour aller plus loin :

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/zonage-pluvial>

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/zonage-pluvial-favoriser-infiltration-eau-pluie-au-plus-pres>

https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/brochure-symasol_isbn_web.pdf

Développer l'agriculture urbaine

Fiche 11

Échelle :

Planification

Commune

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Toutes

L'agriculture urbaine consiste principalement en la production alimentaire de divers types de cultures (légumes, champignons, fruits), des animaux (volailles, lapins, etc.), ainsi que des produits non alimentaires (herbes aromatiques et médicinales, plantes ornementales, etc.). Elle inclut une grande diversité de formes (jardins collectifs, micro-fermes urbaines, fermes urbaines spécialisées, fermes périurbaines maraîchères, ...) et est localisée principalement dans l'intra-urbain, mais peut être également située dans l'espace périurbain lorsque les produits et services sont à destination de « la ville ».

Les projets d'agriculture urbaine naissent dans des espaces que des acteurs (collectivités, acteurs économiques, associations, citoyens etc) décident de conserver, de protéger ou de concevoir spécifiquement pour elle. Ainsi, elle peut être pratiquée sur des toits, dans des cours, des potagers partagés et même dans des espaces publics et connaît depuis ces dernières années un large succès.

En effet, l'agriculture urbaine apporte de nombreux avantages en assurant de nombreuses fonctions au sein du milieu urbain :

- une fonction de production alimentaire bien sûr, souvent alternative aux productions plus conventionnelles (protection du foncier, circuit court, approvisionnement de la restauration collective, lutte contre le gaspillage, structuration de nouvelles filières, changement des pratiques, ...);
- une fonction sociale en recréant des liens sociaux entre citoyens ;
- une fonction environnementale en permettant une meilleure rétention des eaux pluviales, le recyclage des déchets organiques ou encore le développement de la biodiversité en ville ;
- l'agriculture urbaine favorise le développement d'une économie locale et génère des emplois directs et indirects ;
- Enfin, elle peut également répondre à des fonctions de loisirs, de pédagogie et remplir une fonction paysagère grâce à l'accès à de nouveaux espaces de verdure.



Quelques illustrations
d'agriculture urbaine -
Crédit photo : Cerema

Sources :

<https://www.cerema.fr>

Pour aller plus loin :

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/agriculture-urbaine-ecoquartier>

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/videos-pedagogiques-differentes-formes-agriculture-urbaine>

<https://agriculture.gouv.fr/demultiplier-les-jardins-partages-et-developper-lagriculture-urbaine>

<http://www.afaup.org/>

Phyto-management des sols

Échelle :

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Régulation de l'eau : stockage et réserve d'eau, infiltration

Stabilisation, épuration, filtration des nutriments et polluants

Les phytotechnologies appliquées à la gestion des sites et sols pollués regroupent un ensemble de techniques (phytostabilisation, phytoextraction, phyto/rhizodégradation) qui utilisent in situ des espèces végétales pour, selon les cas, contenir ou extraire les métaux, ou dégrader les polluants organiques présents dans les sols. On parle aujourd'hui de phytomanagement lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre l'une ou l'autre de ces phytotechnologies. Jugé plus conformes aux enjeux du développement durable, le phytomanagement permet d'agir positivement sur les fonctions et la structure du sol, et constitue une alternative ou un complément aux techniques conventionnelles dans le cas notamment de surfaces polluées importantes.

Ces techniques innovantes permettent de restaurer et réutiliser des sols dégradés en zone urbaine, en développant des services écosystémiques en lien avec les sols (ex: habitat, capacité tampon, recyclage des nutriments) donnant une valeur supplémentaire à ces territoires en friche (amélioration du cadre de vie, création d'espaces verts, accroissement de la biodiversité).

Le phytomanagement peut en particulier améliorer la diversité microbienne, la séquestration du carbone, limiter la migration des contaminants par l'eau et l'érosion, etc.

Ces techniques considérées comme des techniques de réhabilitation « douces » sont bien perçues par les gestionnaires et opérateurs des sites pollués. Des expérimentations sur l'ensemble du territoire permettent aujourd'hui de disposer de retours d'expérience dans différentes situations de pollution et de donner une vision concrète des apports et limites des différentes solutions appliquées sur le terrain.

Le guide « Phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués » publié par l'INERIS sur le sujet en 2017 vient compléter un premier guide réalisé par l'Ademe et l'INERIS en 2012, qui présentait les techniques de phytotechnologies.

Outil à vocation opérationnelle, il est à usage des utilisateurs potentiels et prescripteurs de ces techniques pour la mise en œuvre concrète de projet de réhabilitation : gestionnaires de sites, bureaux d'étude, administration, société de travaux... Il présente notamment des outils d'aide à la décision simples qui permettent aux aménageurs de déterminer la faisabilité du phytomanagement dans leurs projets et de choisir les techniques les mieux adaptées.

Exemples d'espèces intéressantes pour la phytostabilisation :

Miscanthus sinensis × *giganteus*



Agrostis capillaris



Sources :

« Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués », les Dossiers de l'INERIS, nov. 2018, 8p. <http://www.ineris.fr/centredoc/guidephyto2-mars2017-1496923668.pdf>

« Phytomanagement de sols contaminés et/ou dégradés : de la sélection des assemblages plantes-microorganismes aux processus et fonctions écologiques sources de services écosystémiques », Réseau des écotoxicologues de l'INRA, Fiche thématique N°9, juin 2017, 7p.

Pour aller plus loin :

<https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/tous-dossiers-thematiques/phytotechnologies-appliquees-sites-sols>

Favoriser la renaturation des sols dégradés

Échelle :

Projet d'aménagement

Fonctions des sols favorisées :

Toutes

La renaturation d'un sol peut être définie comme l'ensemble des processus permettant de re-fonctionnaliser un sol dégradé, c'est-à-dire ayant subi des perturbations.

Cette démarche fondée sur des opérations d'aménagements ou de gestion consistant à re-fonctionnaliser les sols que l'on estime dégradés par les activités humaines. L'artificialisation peut en effet causer une perte irréversible de matière – par érosion ou par excavation – mais également une perte des propriétés des sols, notamment une perte de fertilité indispensable au support de la végétation, et les sols artificialisés sont souvent soumis à diverses contaminations, comme la présence anormale de produits potentiellement dangereux dans le milieu.

Renaturer un sol artificialisé implique de déterminer au préalable sa position, son degré d'imperméabilisation et de perturbation et, peut potentiellement nécessiter, selon les cas et le contexte : une déconstruction ; une dépollution ; une désimperméabilisation ; la construction de technosols indispensables à la végétalisation ; enfin, une reconnexion fonctionnelle aux écosystèmes naturels environnants. Il s'agit bien concernant la renaturation des sols en milieu urbain de les désartificialiser et leur rendre ainsi leurs fonctionnalités.

Dans certains cas, là où les sols sont trop dégradés ou effacés par l'imperméabilisation, la construction de sols peut être envisagée à partir de déchets urbains. Cette approche de génie pédologique est guidée par l'usage envisagé de l'espace (squares et parcs, accompagnement de voies de circulation, accompagnement de bâtiments publics, espaces naturels aménagés, arbres d'alignement) et est basée sur des mélanges de matériaux de substitution tels que les briques, bétons, ballast, compost, boues de traitement des eaux usées, etc., afin de reconstituer des horizons fonctionnels.

Le programme ADEME-SITERRE notamment a permis de démontrer la faisabilité de la construction de sols fonctionnels à partir de matériaux recyclés. Cette méthode permet ainsi de répondre à différents enjeux de la ville :

- bénéficier en ville des fonctions assurées par les sols,
- économiser les ressources naturelles habituellement utilisées (terres végétales ou terres agricoles décapées, granulats, ...),
- développer des filières de recyclage des déchets produits par les villes.

D'autres exemples de construction de sol à partir de matériaux recyclés existent hors le programme SITERRE. Il peut s'agir de prises d'initiative au sein de collectivités, d'expérimentations de recherche ou encore d'applications industrielles.

Les coûts des différentes étapes de renaturation sont difficiles à évaluer, notamment parce qu'ils dépendent de l'importance de la transformation initiale des sols. Peu de projets de renaturation complète ont été identifiés à ce jour ; la quantification des gisements de terres renatu-

rables et des coûts des différents processus de renaturation restent de ce fait délicats.

Les quelques données d'évaluation des coûts néanmoins disponibles suggèrent qu'à ce stade la renaturation peut être un outil économiquement viable pour les projets ne nécessitant ni dépollution ni désimperméabilisation (friches non polluées et carrières, par exemple). Mais cet outil est très prometteur car même une renaturation partielle des milieux urbains peut aider à réduire certains impacts négatifs de l'artificialisation, comme les îlots de chaleur par exemple, et combiné à un effort de limitation de l'artificialisation brute des sols permettre d'atteindre l'objectif de zéro artificialisation nette porté par les pouvoirs publics.

La renaturation contribue en outre à la reconstruction de milieux de vie sur des sols anthropisés dégradés offrant ainsi de nouveaux usages à des espaces en friches souvent insérés dans un tissu urbain dense.



Crédit photo : Cerema et grand Lyon



Sources :

« Objectif « Zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ? », rapport France Stratégie, juillet 2019, 54p.

Renaturer les villes – Méthodes, exemples et péconisations, APR, juillet 2022, 148p

Sols vivants – Alternatives à l'artificialisation des sols et réhabilitation des sols dégradés- Guide technique. LPO, 2022, 60p

Pour aller plus loin :

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_le_mag_n143_web.pdf

<https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/>

<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/4784-objectif-zero-artificialisation-nette-zan-et-contribution-de-l-ademe.html>



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN