EXPERTISES

SOLS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE : IMPACTS ET ADAPTATION

ETAT DES LIEUX DE LA RECHERCHE
2016

Rapport final

ADEME
Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

REMERCIEMENTS

Cette étude est réalisée pour le compte de l'ADEME par le bureau d'étude I Care & Consult (Benjamin LÉVÊQUE, Lénaïc MONIOT, Julien DESTRÉS) et les experts Sylvain RULLIER et Yannick POYAT (Sol Paysage), Maribel HERNANDEZ (Acclimatize) et Claire CHENU (AgroParisTech).

Le comité de pilotage de l'étude : Céline PHILLIPS (Service Climat), Emilie MACHEFAUX (Service Climat), Isabelle FEIX (Experte nationale « sol » à l'ADEME), Claire PRENDLELOUP (Service Recherche et Technologies Avancées), Anne GRENIER (Service Recherche et Technologies Avancées), Antonio BISPO (Service Agriculture et Forêt), Thomas EGLIN (Service Agriculture et Forêt), Sophie DEBERGUE (Service Organisation Urbaine).
Le Comité d'Orientation Technique a contribué à l'orientation de ce rapport. Ses membres, cités ci-dessous, ont été réuni sous le pilotage de l'ADEME et l'animation d'I Care & Consult :

- Claire CHENU (AgroParisTech)
- Jean-Claude GÉGOUT (AgroParisTech)
- Christine KING (ANR)
- Nicolas BÉRIOT (ONERC)
- Eric MARTIN (IRSTEA)
- Katia CHANCIBAULT (IFSTTAR)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, I-CARE & Consult, 2016. Sols et Changement climatique : Impacts et Adaptation. Etat des lieux de la recherche et identification de pistes de recherche. 2016. 93 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1516C0023

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : I-CARE & Consult

Coordination technique - ADEME : PHILLIPS Céline
Direction/Service : Direction Exécutive des Programmes, Service Climat

SOMMAIRE

RÉSUMÉ 5

1. Introduction et éléments de cadrage 7

1.1. Les projections climatiques pour la France 7

1.2. Les priorités nationales d'adaptation au changement climatique 11

1.3. Les propositions pour un cadre national de gestion durable des sols 12

1.4. La stratégie « Adaptation au changement climatique » de l'ADEME 13

1.5. La stratégie « Recherche Développement Innovation » de l'ADEME 13

1.6. Le plan d'actions « Gestion Durable des Sols » de l'ADEME 16

2. Objectifs et périmètre de l'étude 17

2.1. Objectifs de l'étude 17

2.2. Périmètre de l'étude 17

3. Méthodologie employée 19

3.1. Comité d'Orientation Technique 19

3.2. Revue bibliographique 19

3.3. Entretiens avec les experts 19

3.4. Identification des acteurs, des programmes et des projets de recherche traitant des questions de changement climatique et des sols 20

3.5. Production de matrices synthétisant le besoin d'approfondissement des connaissances 20

3.6. Identification de questions et pistes de recherche 21

4. Les acteurs, programmes et projets de recherche traitant des questions de changement climatique et de sols 22

4.1. Les principaux acteurs recensés au niveau national 22

4.2. Les programmes et projets de recherche traitant des sols et du changement climatique 23

4.2.1. Les principaux programmes de recherche identifiés au niveau européen 23
4.2.2. Les principaux projets de recherche 24
4.2.3. Les projets de recherche achevés 25
4.2.4. Les projets de recherche en cours 27

5. Impacts du changement climatique sur les sols 30

5.1. L'état des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols 30

5.2. Le degré d'impact du changement climatique sur les sols 32

5.3. L'enjeu d'approfondissement des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols 35

6. Rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique 37

6.1. L'état des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique 37

6.2. Le degré de contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique 39

6.3. L'enjeu d'approfondissement des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique.....41

7. Pistes de recherche pour l'approfondissement des connaissances 43

7.1. Quels sont les impacts du changement climatique sur les sols ?.....45

7.2. Quelles sont les mesures permettant d'adapter les sols au changement climatique ? 49

7.3. Comment les sols peuvent-ils contribuer à l'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ? 50

7.4. Quels sont les impacts sur la qualité des sols des mesures d'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ? 51

8. Conclusion 53

RÉSUMÉ

Le sol constitue une formation superficielle issue de l'altération de la roche sous-jacente, par l'action du climat et des organismes vivants. Il se situe à l'**interface des compartiments environnementaux** que sont l'atmosphère, la biosphère et les eaux et représente donc un milieu d'échanges indispensable à la régulation des cycles planétaires (eau, carbone, azote). Le **changement climatique** a un impact très important sur les sols, notamment sur les flux de matière organique et les différents processus à l'œuvre dans ce milieu. Les sols ont par ailleurs un rôle majeur à jouer dans le cadre de l'**adaptation** au changement climatique, par exemple en tant que réservoirs d'eau ou en tant que support pour la végétation des espaces verts avec lesquels ils participent à lutter contre les îlots de chaleur urbains. Enfin, le sol est de manière générale un milieu peu étudié en tant qu'élément du système climatique.

Face à ces constats, l'ADEME a souhaité engager une étude visant à dresser **l'état des lieux de la recherche** sur le rôle du sol dans l'adaptation au changement climatique, et les impacts du changement climatique sur les sols, leurs **fonctions écologiques** et les **services écosystémiques** qu'ils rendent. Les objectifs de la mission étaient les suivants :

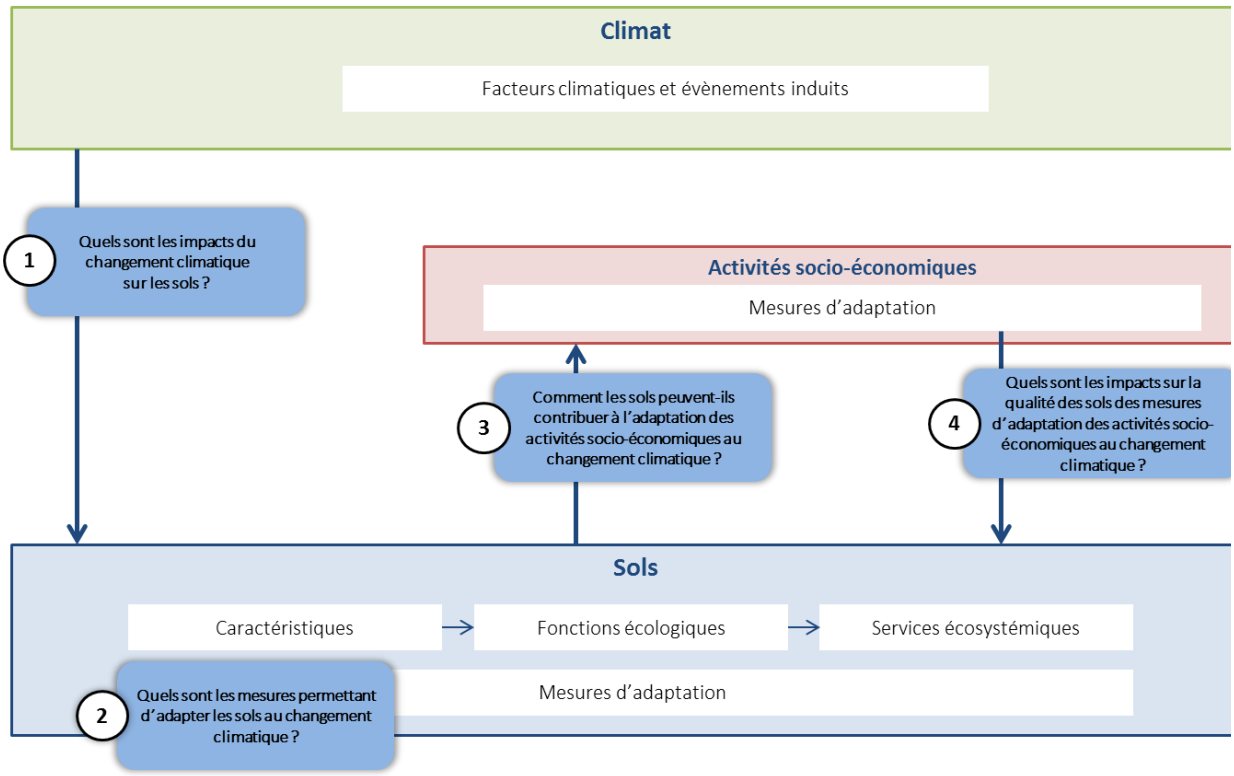
- identifier les principaux programmes et projets de recherche menés sur ces sujets, ainsi que les acteurs concernés par leur mise en œuvre ;
- produire un état des connaissances relatif aux impacts du changement climatique sur les sols et au rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique ;
- identifier les problématiques qui nécessitent davantage de travaux de recherche afin de déterminer un certain nombre de questions et pistes de recherche améliorant l'état des connaissances.

Le rapport de l'étude rappelle tout d'abord les projections climatiques pour la France, les stratégies nationales d'adaptation au changement climatique et les propositions pour un cadre national de gestion durable des sols. Il expose ensuite la stratégie « Adaptation au changement climatique » et la stratégie « Recherche Développement Innovation» de l'ADEME.

L'étude dresse un **état des lieux** des principaux programmes de recherche et publications traitant d'une part des impacts du changement climatique sur les sols, et d'autre part du rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique et des thématiques et résultats obtenus.

L'analyse croisée du **besoin en connaissances** et du **degré d'impact du changement climatique** sur les sols ou du **degré de participation des sols à l'adaptation** a permis ensuite d'identifier les **champs de recherche nécessitant un approfondissement**. Ce travail a été appuyé par une série d'entretiens réalisés avec les principaux acteurs de la recherche travaillant sur ces thématiques et par un **Comité d'Orientation Technique**, qui a eu notamment une fonction ressource pour la réalisation de l'analyse bibliographique et pour l'identification de questions et de pistes de recherche.

38 pistes de recherche identifiées ont été organisées autour de quatre grandes questions de recherche suivantes :



1) **Quels sont les impacts du changement climatique sur les sols ?** Cette question vise à approfondir les connaissances des impacts du changement climatique sur les sols : leurs propriétés, leurs fonctions écologiques et les services écosystémiques qu'ils rendent (***26 pistes***).

2) **Quelles sont les mesures permettant d'adapter les sols au changement climatique ?** Il s'agit ici d'identifier les mesures qui modifient les propriétés des sols (texture, structure, teneur en matière organique, etc.) et donc les fonctions écologiques qu'ils fournissent (régulation de la température, support de la végétation, etc.) leur permettant de s'adapter au changement climatique ***(4 pistes)***.

3) **Comment les sols peuvent-ils contribuer à l'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ?** Cette question traite surtout de l'articulation entre les fonctions des sols et les services écosystémiques qu'ils peuvent fournir ; l'adaptation au changement climatique d'une activité socio-économique constitue alors un service rendu par les sols ***(5 pistes)***.

4) **Quels sont les impacts sur la qualité des sols des mesures d'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ?** Cette question vise à connaître dans quelle mesure les actions qui sont mises en place dans un objectif d'adaptation au changement climatique des activités socio-économiques ont des impacts (positifs ou négatifs) sur les sols eux-mêmes ***(4 pistes).***

La mise en perspective des questions de recherche à approfondir avec les différents domaines d'intervention de l'ADEME va permettre à l'agence de définir sa position sur ces problématiques.

1. Introduction et éléments de cadrage

Hausse des températures, périodes de canicule plus fréquentes, sécheresses plus sévères sont attendues à la fin du siècle. Faire face aux changements climatiques qui affecteront de nombreux secteurs d'activités (agriculture, tourisme, bâtiments et infrastructures…) implique donc d'entreprendre deux types d'actions complémentaires : celles visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, dites d'**atténuation**, et celles visant à réduire la vulnérabilité des systèmes socio-économiques et environnementaux, regroupées sous le terme d'**adaptation**.

Le concept d'adaptation au changement climatique a fait l'objet de modifications successives depuis le Troisième Rapport du GIEC (2001) ; le Cinquième rapport publié en 2014 présente l'adaptation comme « *une démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences* ».

Afin de gérer les risques futurs et de renforcer la résilience, les stratégies à mener peuvent être de trois ordres : des **stratégies de réduction de la sensibilité et de l'exposition**, par le biais de mesures, plans et pratiques **d'adaptation** (adaptation incrémentale) et des **stratégies de transformation** qui concernent principalement les activités sociales, voire institutionnelles, ainsi que les activités liées au domaine d'intervention des collectivités. De ce fait, la France a fixé plusieurs priorités nationales d'adaptation au changement climatique via l'élaboration du plan national d'adaptation au changement climatique 2011-2015, réalisée par le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) et parue en novembre 2015.

Face à ces constats, l'ADEME a mis en place une **stratégie d'adaptation** dans laquelle elle a défini un certain nombre de principes d'actions pour la prise en compte de l'adaptation au changement climatique, en lien avec ses champs de compétences et d'intervention habituels.

Le sol est un élément important et souvent négligé du système climatique. Il constitue une formation superficielle issue de l'altération de la roche sous-jacente, par l'action du climat et des organismes vivants. Il se situe à l'interface des compartiments environnementaux que sont l'atmosphère, la biosphère et les eaux et représente donc un milieu d'échanges indispensable à la régulation des cycles planétaires (eau, carbone, azote). Suivant la région considérée, le changement climatique pourrait accélérer le risque de dégradation des sols et de ses principales propriétés et pourrait impacter leur capacité à rendre des services écosystémiques, venant aggraver les impacts de la pression anthropique. De ce fait, le rapport du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) et du CGEDD publié en septembre 2015 intitulé « **Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols** » a suggéré que la conception d'un cadre national de gestion durable des sols constituerait une réponse adaptée au problème posé et au contexte réglementaire actuel. Il permettrait de traduire, dans une stratégie nationale, une vision transversale et de long terme.

Parallèlement et partant des mêmes constats sur l'état des sols, l'ADEME a finalisé un plan d'actions « gestion durable des sols » fin 2015.

Les paragraphes suivants présentent les projections climatiques pour la France, les priorités nationales d'adaptation au changement climatique, les propositions pour un cadre national de gestion durable des sols, ainsi que les stratégies adaptation et recherche de l'ADEME.

1.1. Les projections climatiques pour la France

Au cours des dernières décennies, le changement climatique a eu des impacts sur les systèmes naturels et humains de tous les continents ainsi que sur l'ensemble des océans. Les principaux effets s'observent sur les systèmes naturels. Le cinquième rapport du GIEC a montré l'inéluctabilité de certains impacts du changement climatique, quelles que soient les actions d'atténuation et d'adaptation qui seraient mises en œuvre à l'avenir, notamment avec une hausse de la température d'ici 2100 de 1,1°C à 6,4°C (valeurs de référence). En effet, compte tenu de l'inertie du système climatique, le réchauffement va s'amplifier durant les décennies à venir et ce même si les émissions de gaz à effet de serre cessaient brutalement.

À cause du changement climatique, le niveau de la mer continue de monter. Au fil des décennies et des siècles, de plus en plus d'habitants de la planète seront menacés, en particulier dans les îles et les grandes villes du littoral. Le GIEC prédit une élévation du niveau de la mer de près d'un mètre d'ici 2100.

Le rapport « Le climat de la France au XXIème siècle – Volume 4 – Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer », rédigé sous la direction de Jean Jouzel, a permis de mettre en évidence des tendances sur l'évolution des températures et précipitations en France par rapport à une période moyenne de référence 1976-2005.

Ces évolutions temporelles ont été simulées par l'intermédiaire de deux modèles climatiques régionaux mis en œuvre au CNRM[1] et à l'IPSL[2], en collaboration avec l'INERIS[3], et s'appuyant sur trois des quatre scénarios considérés dans le rapport du GIEC 2013-2014.

Pour la **France métropolitaine, à l'horizon 2071-2100**, les tendances suivantes ont été mises en évidence :

- Les <u>températures moyennes</u> pourraient subir une forte hausse (cf. Tableau 1), qui devrait être particulièrement marquée vers le Sud-Est du pays, et pourrait largement dépasser les 5 °C en été par rapport à la moyenne de référence ; elles sont ici présentées pour deux scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) qui sont des scénarios d'évolution de la concentration en gaz à effet de serre, ils sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif obtenue en 2100 (RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 W/m^2) :

Scénario RCP2.6	Hiver	0,9°C [0,4 °C / 1,4 °C]
	Eté	1,3 °C [0,6 °C / 2 °C]
Scénario RCP8.5	Hiver	3,4 °C à 3,6 °C [1,9 °C / 3,4 °C]
	Eté	2,6 °C à 5,3 °C [3,2 °C / 5,1 °C]

Tableau 1 : Evolutions des températures en France métropolitaine à l'horizon 2071-2100. Source : Ouzeau et al., 2014.

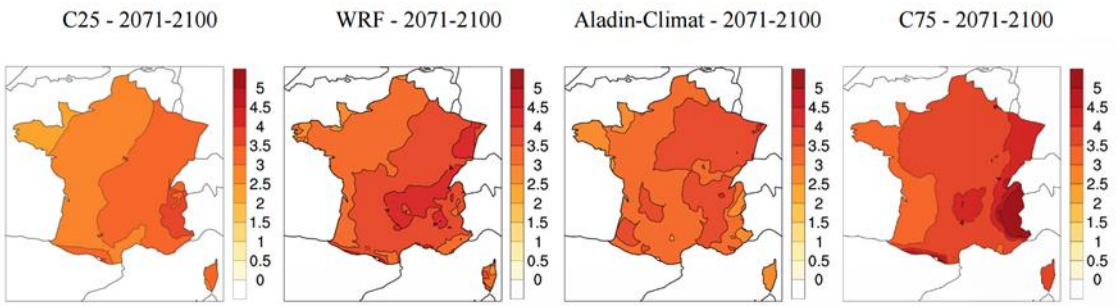


Figure 1 : Écarts de température hivernale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2071-2100 (de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble[4]). Source : Ouzeau et al., 2014[5].

[1] CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France

[2] IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

[3] INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

[4] WRF et Aladin-Climat sont deux modèles régionaux, le 25e centile, correspond à une fourchette basse, le 75e centile à une fourchette haute

[5] Ouzeau *et al.*, 2014. Le climat de la France au XXIe siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4_VF_2.pdf

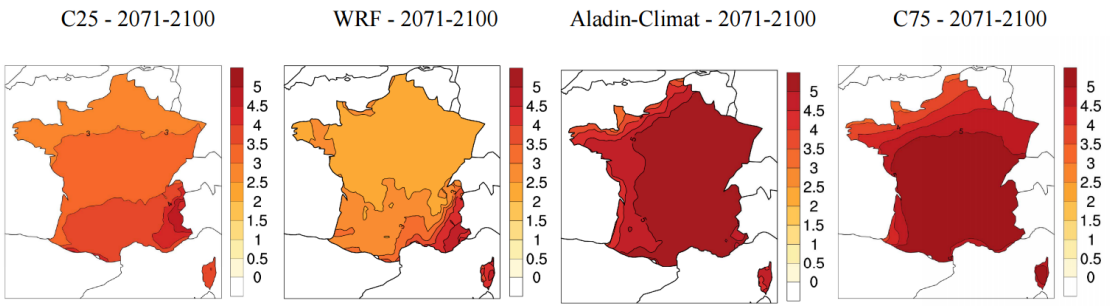


Figure 2 : Écarts de température estivale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2071-2100 (de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble). Source : Ouzeau et al., 2014.

- Le nombre de jours de vagues de chaleur en été sera également en forte augmentation, et pourrait dépasser les 20 jours selon le scénario RCP8.5 ;

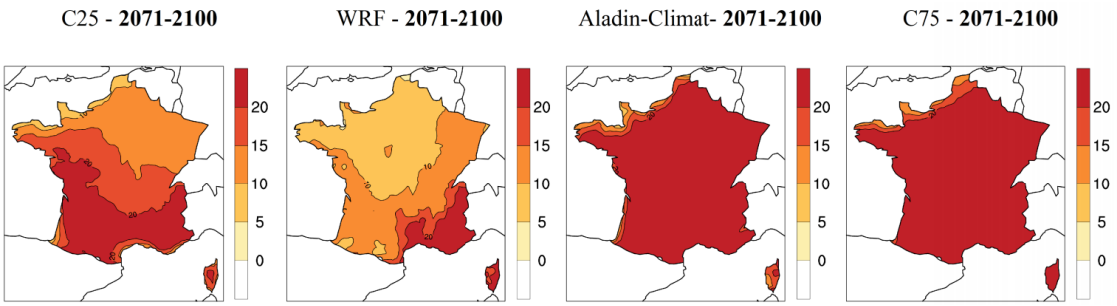


Figure 3 : Nombre de jours d'écart de vagues de chaleur en été par rapport à la période de référence 1976-2005 pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2071-2100 (de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble). Source : Source : Ouzeau et al., 2014.

- Les jours d'extrêmes froids diminueront d'ici la fin du siècle, de l'ordre de 6 à 10 jours de moins que la référence dans le Nord-Est de la France. Cette diminution devrait être plus limitée sur l'extrême Sud du pays ;
- Les précipitations hivernales sont prévues pour augmenter, de l'ordre de 0,1 à 0,85 [-0,19 / +0,54] mm/jour selon les modèles et les scénarios (soit un excédent équivalent de 9 à 76 mm en moyenne hivernale) ;

Scénarios RCP4.5 et RCP 8.5	Modèle Aladin-Climat	Diminution comprise entre -0,16 et -0,38 [-0,7/0] mm/jour (environ 15 à 35 mm de moins en moyenne estivale)
	Modèle WRF	Augmentation des précipitations de 0,15 à 0,32 mm/jour
Scénario RCP2.6	Modèle Aladin-Climat	Légère augmentation des précipitations estivales de 0,05 [-0,31/+0,14] mm/jour

Tableau 2 : Evolution des précipitations en France métropolitaine à l'horizon 2071-2100 Source : Ouzeau et al., 2014.

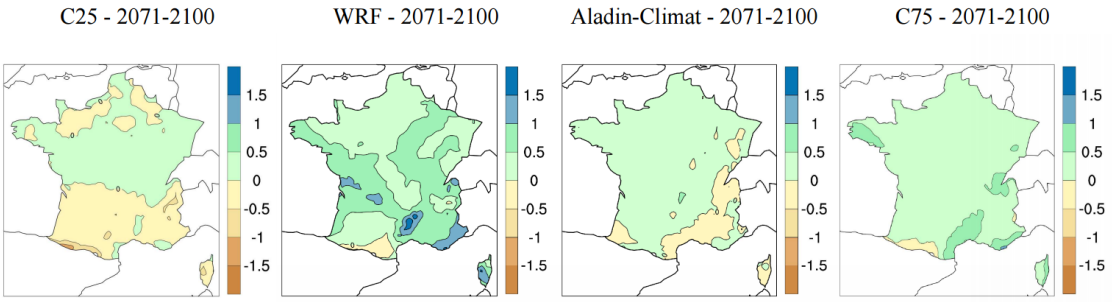


Figure 4 : Écarts de précipitations hivernales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2071-2100 (de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble). Source : Ouzeau et al., 2014.

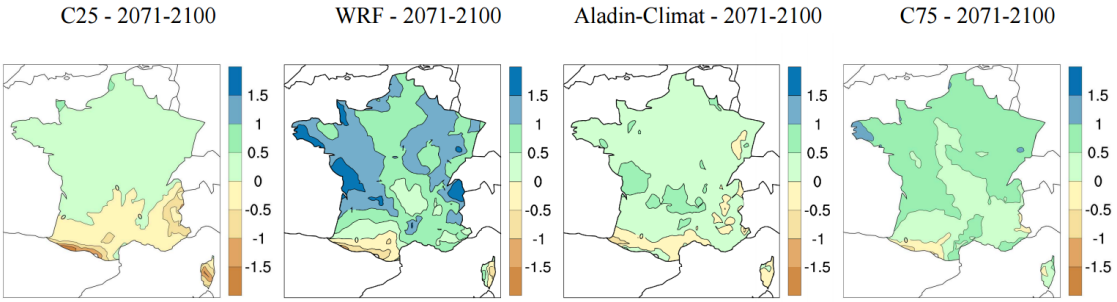


Figure 5 : Écarts de précipitations hivernales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2071-2100 (de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble). Source : Ouzeau et al., 2014.

- Le taux de précipitations extrêmes augmentera sur une large partie du territoire, dépassant 5% dans certaines régions selon le scénario RCP8.5, mais avec une forte variabilité des zones concernées selon le modèle ;

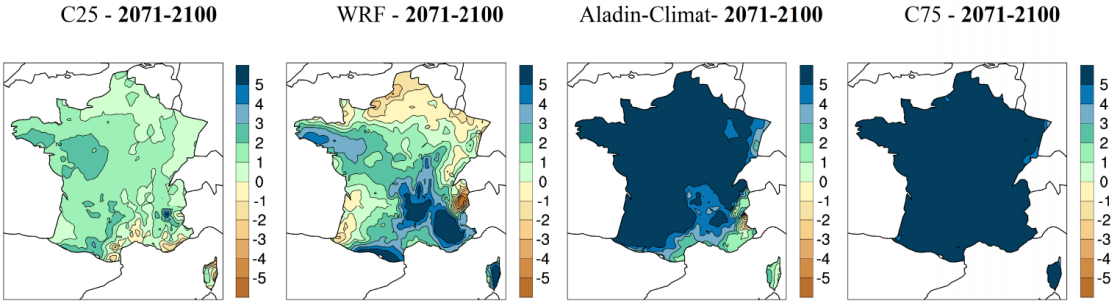


Figure 6 : Pourcentage d'écart aux précipitations extrêmes annuelles par rapport à la période de référence 1976-2005 pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2071-2100 (de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble). Source : Ouzeau et al., 2014.

- Les épisodes de sécheresse augmenteront dans une large partie Sud du pays, mais pouvant s'étendre à l'ensemble du pays.

En ce qui concernent les **régions d'outre-mer**, les simulations sont uniquement issues du modèle Aladin-Climat et ne permettent donc pas une estimation d'incertitude. Les principales tendances sont les suivantes :

- A l'horizon 2100, la température augmentera de l'ordre de 0,7°C pour le scénario RCP2.6 et de 3 à 3,5°C pour le scénario RCP8.5 ;
- Une diminution des précipitations moyennes pourra avoir lieu, en particulier pour la saison sèche.

L'ensemble de ces paramètres (écarts de températures hivernales et estivales, températures extrêmes, écarts de précipitations hivernales et estivales, précipitations extrêmes, …) aura un impact très significatif sur les sols de manière directe ou indirecte à travers la couverture végétale.

1.2. Les priorités nationales d'adaptation au changement climatique

L'évaluation du **Plan National d'Adaptation au Changement Climatique 2011-2015 (PNACC)**, réalisée par le CGEDD et parue en novembre 2015 a permis : de mettre en perspective le plan national dans un contexte international, de réaliser une synthèse de son évaluation et d'esquisser des recommandations pour un futur plan couvrant la période 2017-2021.

Il ressort de cette évaluation que la France a amélioré sa préparation au changement climatique et a réussi à produire un certain nombre de résultats remarquables, tout en progressant de façon insuffisamment coordonnée. En effet, 80 % des 84 actions et environ 75 % des 242 mesures lancées seront mises en œuvre de manière effective d'ici la fin 2016.

Parmi les résultats remarquables de ce plan, il y a :

- L'amélioration des connaissances quant aux évolutions attendues du climat de la France au XXIème siècle ;
- La production d'outils de planification pour les bassins hydrographiques (avec la prise en compte partielle de l'adaptation dans les SDAGE), le littoral (en lien avec le développement d'une stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte), en matière de stratégies locales de gestion du risque d'inondation et de l'intégration du relèvement des niveaux marins de référence dans les PPR littoraux, de l'inclusion d'un volet d'adaptation dans les schémas de massifs montagneux et de l'intégration de schémas de continuités écologiques dans les documents d'urbanisme et de planification ;
- La mise en œuvre de mesures opérationnelles pour adapter certains secteurs d'activité économiques ou à incidences essentielles comme les installations nucléaires, les infrastructures de transport, des expertises menées par le CNEV sur la surveillance renforcée des maladies vectorielles et de l'actualisation des conseils d'utilisation des principales essences forestières de reboisement pour faire face aux évolutions climatiques attendues.

Parmi les recommandations pour un nouveau PNACC figure le souhait d'une plus grande déclinaison territoriale, dont une plus grande articulation avec les plans territoriaux (PCAET, PLUi…), et l'entraînement de l'ensemble des acteurs économiques dans la prise en compte de l'adaptation.

Le développement de l'effort scientifique de recherches finalisées pourra être mis en œuvre si le ministère en charge de l'environnement se dote d'un programme de recherche finalisée de 2 à 3 M€ par an, et s'il parvient à instaurer un centre technique de ressources associant étroitement le CEREMA et l'ADEME. L'analyse économique et prospective de l'analyse a été également soulignée comme méritant plus d'attention.

Parmi l'ensemble des recommandations issues de la stratégie nationale et des groupes de concertation, trois priorités devraient être pilotées de façon plus transverse et selon un mode projet :

- La **ressource en eau disponible** et la nécessité d'engager des économies d'eau à grande échelle dans les sous-bassins déficitaires ;
- L'adaptation en **zone littorale** qui appelle, au-delà des expérimentations engagées jusqu'ici, une réelle solution aux inévitables relocalisations d'activités ou de biens à opérer au cours des prochaines décennies ;
- L'adaptation des **villes et de l'espace public** afin de mieux prémunir les citadins des épisodes de canicule et de sécheresse futurs.

Des thématiques nouvelles pourraient apparaître, telles que la diplomatie de l'adaptation au changement climatique et la participation à ce nouveau plan d'autres départements ministériels. De plus, l'identification des domaines prioritaires et le développement des approches par filière économique sont préconisés pour entraîner la sphère économique privée. Enfin, la question du financement de l'adaptation mérite une attention renouvelée, afin de pallier le déséquilibre entre besoins et offres de financement.

1.3. Les propositions pour un cadre national de gestion durable des sols

Le rapport du CGAAER et CGEDD publié en septembre 2015 intitulé « **Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols** »[6] a suggéré que la conception d'un cadre national de gestion durable des sols constituerait une réponse adaptée au problème posé et au contexte réglementaire actuel. Il permettrait de traduire, dans une stratégie nationale, une vision transversale et de long terme. Ce cadre serait composé de 4 axes thématiques et cinq axes transversaux.

- **Axes thématiques :**

1/ Assurer un bon fonctionnement des sols agricoles, forestiers et naturels, en fournissant aux gestionnaires concernés les connaissances et les outils d'aide à la décision pour que ces derniers adoptent des pratiques permettant de conserver ou d'améliorer l'état de leur sol, à l'aide le cas échéant d'instruments politiques et économiques incitatifs ;

2/ Mieux gérer les sols urbains, en précisant l'objectif de réduction de l'extension urbaine et en réduisant l'augmentation nette de l'artificialisation des sols. Cet objectif serait à décliner dans les documents stratégiques de planification territoriale. Des observatoires adaptés aux différentes échelles devraient permettre d'en assurer un suivi. Promouvoir pour cela des projets d'urbanisation moins consommateurs d'espace, notamment par une utilisation facilitée des friches urbaines, et mettre en place des outils fiscaux adaptés ;

3/ Prévenir et remédier à la pollution des sols, en luttant contre la contamination par les pollutions ponctuelles historiques, en prévenant celle par les pollutions diffuses et en facilitant la réutilisation des sols pollués et des friches en milieu urbain pour lutter contre la consommation de nouveaux espaces ;

4/ Adapter les sols au changement climatique et renforcer leur contribution à son atténuation, en renforçant notamment le stockage de carbone dans les sols, grâce à la recherche et la diffusion des bonnes pratiques de gestion.

- **Axes transversaux :**

5/ Décliner territorialement la politique des sols, en traduisant le cadre national aux différentes échelles de planification territoriale, notamment dans le nouveau schéma régional d'aménagement de développement durable et d'égalité des territoires, les schémas de cohérence territoriale et les plans locaux d'urbanisme ;

6/ Développer la recherche sur les sols, à travers une programmation coordonnée de la recherche-développement finalisée axée sur les objectifs thématiques précédents, en développant les dispositifs de recherche participative, et en favorisant la création d'un espace de dialogue technique réunissant les opérateurs actuels de la recherche appliquée ;

7/ Améliorer la connaissance des sols, à partir notamment d'un schéma national des données sur les sols à élaborer, de la mise en réseau de l'ensemble des producteurs et gestionnaires de données, de la mutualisation des méthodes et des outils de valorisation, et faciliter l'accès aux données ;

8/ Former et sensibiliser à l'enjeu de la préservation des sols, dans les programmes d'enseignement général et technique, en visant, au-delà de la sphère agricole et forestière, également une sensibilisation des élus, des aménageurs et des professionnels des travaux publics ;

---

[6] BELLEC, P., LAVARDE, P., LEFEBVRE, L., MADIGNIER, M.-L., 2015. Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols.

9/ Agir à l'international en faveur de la préservation des sols, notamment en initiant des programmes de recherche en partenariat avec d'autres pays au niveau européen et international, et en développant une stratégie d'influence au sein de l'Union européenne pour mieux faire prendre en compte les priorités françaises en matière de gestion des sols dans les évolutions des politiques communautaires concernées.

A ces neuf axes s'ajoute un dixième axe relatif à la gouvernance, pour piloter et faire vivre la stratégie sur le long terme. Le rapport suggère ainsi une durée de dix ans avec une révision à mi-parcours, la mise en place d'un pilote interministériel assurant la coordination des actions de l'État sur les sols, et celle d'un réseau associant les différents services de l'ensemble des ministères concernés travaillant sur la thématique foncier/sol. Le suivi de la mise en œuvre de la stratégie pourrait être confié à une commission spécialisée du Conseil National de la Transition Ecologique (CNTE).

1.4. La stratégie « Adaptation au changement climatique » de l'ADEME

Conformément au décret n° 2009-603 du 28 mai 2009 relatif à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, l'ADEME doit inscrire ses missions « dans le cadre de la politique définie par le Gouvernement notamment de lutte contre le changement climatique et d'adaptation aux conséquences de ce changement ». C'est pourquoi elle s'est dotée, en 2010, d'une stratégie Adaptation au changement climatique.

Tel que prévu dans son contrat d'objectifs, « *l'ADEME veillera à intégrer les conditions d'adaptation au changement climatique dans ses principales actions et assurera une sensibilisation des publics et une information des porteurs de projets au regard de cette démarche nécessaire* ». De plus, dans le cadre des actions transversales « villes et territoires durables », « *elle portera une attention nouvelle à la problématique d'adaptation au changement climatique des villes et territoires* ».

L'ADEME a alors défini un certain nombre de principes d'actions pour la prise en compte de l'adaptation au changement climatique, en lien avec ses champs de compétences et d'intervention habituels : le plan d'action présentera notamment un axe territorial important, compte-tenu du fait qu'une approche locale du changement climatique est primordiale, proposant des mesures « sans regret » (bénéfiques quel que soit le niveau de changement climatique) et des actions permettant de « sécuriser » les acquis des politiques portées par l'ADEME.

Une des actions de l'ADEME concerne l'appropriation de la thématique adaptation en interne, ainsi qu'à l'externe, vers ses partenaires, à travers la mise en place de : formations internes générales, de formations à destination des chargés de communication et chargés des plans climat (pouvant être élargies aux relais de l'ADEME), et des formations vers les équipes travaillant sur la maîtrise d'ouvrage de la dépollution des sites polluées (en lien avec le risque inondation).

La stratégie se décline en **5 axes prioritaires** :

1. Apporter aux partenaires, en particulier les collectivités, des démarches et des outils pour la mise en œuvre de leurs actions en matière d'adaptation (centre de ressources) ;
2. Approfondir la recherche sur les technologies d'adaptation à faibles émissions de GES et valoriser les résultats ;
3. Intégrer la composante de l'adaptation au changement climatique dans les principales actions de l'Agence et favoriser la prise en compte de cette thématique par les porteurs de projets ;
4. Approfondir la connaissance des aspects socio-économiques sur l'adaptation au changement climatique ;
5. Contribuer aux propositions sur l'adaptation au changement climatique dans la préparation des négociations internationales.

1.5. La stratégie « Recherche Développement Innovation » de l'ADEME

L'ADEME s'est dotée d'une stratégie « Recherche Développement Innovation » pour les années 2014-2020. L'objectif général de cette stratégie est d'encourager les recherches accompagnant la transition énergétique, écologique et la lutte contre le changement climatique en vue de préparer et de soutenir les actions opérationnelles de l'ADEME. Celui-ci peut être décliné en **4 objectifs spécifiques** :

1. Favoriser l'émergence de nouvelles solutions/services et technologies énergétiques, environnementales et de lutte contre le changement climatique ;
2. Produire des connaissances contextualisées, pertinentes pour les acteurs socio-économiques et directement utilisables par eux en accompagnant les projets de recherche-action ;
3. Accompagner les travaux de recherche préfigurateurs des actions de normalisation, réglementation, labels et certifications ;
4. Renforcer la cohérence entre les recherches communautaire, nationale et régionale.

Cette stratégie « Recherche Développement Innovation » se traduit au travers de plusieurs modalités d'intervention : le soutien financier de programmes de thèses, d'appels à projet de recherche compétitifs et d'appels à manifestation d'intérêt dans le cadre des Programmes d'Investissement d'Avenir, aux moyens de différents types de financement (allocations doctorales, subventions…).

	Faire sa thèse avec l'ADEME	Développer son projet de R&D	Financer son projet d'innovation
Spécificités de programmes	Programme thèse	Programme recherche et développement	Programme Investissements d'Avenir
Type de financement	Allocation doctorale	Subventions principalement, et aides remboursables	Aides remboursables et subventions ; Prise de participation
Bénéficiaire	Doctorants (contrat de travail de 3 ans avec l'ADEME)	Organismes de recherche ; entreprises ; associations et collectivités	Entreprises principalement
Type de projets financés	Concept-faisabilité	Développement-mise en œuvre expérimentale – recherche action – recherche pré-normative	Démonstration ; expérimentation échelle 1 ; première industrielle
Maturité des projets/ TRL	TRL 3 à 4	TRL 4 à 7	TRL 6 à 9+

La stratégie se décline en **13 programmes spécifiques**, pour lesquels des axes thématiques de recherche et le type de recherche attendu est précisé, à l'aide notamment de l'échelle d'évaluation du degré de maturité ou TRL (Technology Readiness Level). De façon générale, les programmes se situent parmi les TRL 4 à 7.

Étapes TRL	***Description***
TRL0 : Idea	*Idée ou concept non prouvés*
TRL 1 : Basic Research	*Observation du principe de base*
TRL 2 : Technology formulation	*Formulation du concept technologique*
TRL 3 : Applied Research	*Preuve expérimentale de conception*
TRL 4 : Small Scale Prototype Development Unit (PDU)	*Validation de la technologie en laboratoire*
TRL 5 : Large Scale Prototype Development Unit	*Validation de la technologie en environnement réel*
TRL 6 : Prototype System	*Démonstration de la technologie en environnement réel*
TRL 7 : Demonstration System	*Démonstration du système à l'échelle du prototype en environnement opérationnel*
TRL 8 : First of the kind commercial System	*Qualification d'un système complet*
TRL 9 : Full commercial application	*Système réel démontré en environnement opérationnel*

7. Les TRL, échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie qui comporte neuf niveaux, sont utilisés, initialement par le DOE (Department of Energy, États-Unis), pour identifier le positionnement d'une technologie dans le processus qui mène au développement. Cela permet de suivre la progression réalisée d'un projet ou d'une thématique donnée de la recherche de base à la mise sur le marché.

Figure 8 : les différents types de recherches attendues par l'ADEME

Les 13 programmes spécifiques sont les suivants :

- **Villes et territoires durables :**
  - Cadre bâti : des territoires durables aux bâtiments performants (TRL 4 à 7) ;
  - Transport et mobilités : des véhicules propres et économes en énergie aux systèmes complexes de mobilité (TRL 4 à 7 et 9) ;
  - Systèmes énergétiques intelligents et leurs environnements (TRL 4 à 7).
- **Production durable et énergies renouvelables :**
  - Ecoconception et éco-efficience des systèmes de production (TRL 4 à 7) ;
  - Production, gestion et stockage des vecteurs énergétiques issus de sources renouvelables (TRL 4 à 7) ;
  - Captage et valorisation du CO_2 (TRL 4 à 7) ;
  - Déchets et matières : collecte, tri, recyclage et valorisation des déchets (TRL 4 à 7).
- **Agriculture, forêt, sols et biomasse :**
  - Production durable des matières premières agricoles et forestières (TRL 4 à 7) ;
  - Caractérisation, mobilisation et valorisation de la biomasse (TRL 4 à 7) ;
  - Gestion durable des sols, réhabilitation des sites pollués et reconquête des fonciers dégradés, stockage géologique du CO_2 (TRL 4 à 7).
- **Qualité de l'air, impacts sur la santé et l'environnement :**
  - Préservation et amélioration de la qualité de l'air (TRL 4 à 7) ;
  - Evaluation des impacts environnementaux et sanitaires, aide à la décision.
- **Energie, environnement et société**

Un seul programme de recherche concerne plus particulièrement les **sols**, il s'agit de « Gestion durable des sols, réhabilitation des sites pollués et reconquête des fonciers dégradés, stockage géologique du CO_2 ». Le type de recherche attendu est de la recherche action et correspond aux TRL 4 et 7, respectivement Validation de la technologie en laboratoire et Démonstration du système à l'échelle du prototype en environnement opérationnel. Ce programme est détaillé en 3 axes thématiques :

- **Axe thématique 1 : qualité, usages et services des sols ;**
  - Compréhension du fonctionnement du sol et des services rendus[7] ;
  - Observation de la qualité des sols et évaluation des impacts du changement climatique ;
  - Analyse des impacts des changements d'affectation des sols ;
  - Aspects sociaux, économiques et politiques.
- **Axe thématique 2 : réhabilitation des sites pollués et reconquête des fonciers dégradés**
  - Caractérisation des pollutions des sols et des eaux souterraines et de leurs impacts sanitaires et environnementaux ;
  - Développement des technologies de traitement des sols et des eaux souterraines et évaluation de leurs performances ;
  - Développement et évaluation des méthodes de reconstruction des sols et de gestion d'espaces dégradés ;
  - Facilitation du recyclage foncier dans les stratégies urbaines.
- **Axe thématique 3 : stockage géologique du CO_2**
  - Caractérisation et gestion des sites de stockage du CO_2 ;
  - Conflits d'usages au sein du sous-sol, faisabilité sociale, aspects économiques et réglementaires.

[7] Parmi les services rendus par les sols, figure celui de contribution à l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à ses conséquences.

1.6. Le plan d'actions « Gestion Durable des Sols » de l'ADEME

L'ADEME s'est dotée d'un plan d'actions « Gestion Durable des Sols » pour les années 2016-2018. Son objectif général est de contribuer, avec l'ensemble des acteurs de la société, à la préservation et l'utilisation durable des sols (prévention vis-à-vis des dégradations des sols ; restauration des sols dégradés ; préservation, optimisation et restauration des services et fonctions qu'ils rendent). Le plan d'actions est décliné en **15 actions** regroupées dans **5 axes** (2 axes transversaux et 3 axes thématiques) :

- **Axe 1 transversal – Prise de conscience et reconnaissance des enjeux et des services rendus**
  - 1.A. Accompagner l'inventaire, la cartographie & l'observation des sols
  - 1.B. Coordonner la recherche sur la gestion durable des sols au sein de l'ADEME
  - 1.C. Développer et intégrer des critères et indicateurs « sol » dans les méthodes de bilan et d'évaluation environnemental(e) et de labellisation
  - 1.D. Sensibiliser les acteurs aux enjeux de la gestion durable des sols et développer l'expertise « sol » au sein de l'ADEME
  - 1.E. Accompagner la normalisation « sol » et l'émergence ou le renforcement de législations cadres et sectorielles « gestion durable des sols »
- **Axe 2 thématique – Occupation des sols**
  - 2.A. Connaître les impacts de l'aménagement sur les sols et déterminer les moyens d'optimiser les services rendus par les sols urbains ou artificialisés
  - 2.B. Prévenir l'artificialisation des sols et optimiser et restaurer les services rendus par les sols urbains et péri-urbains
- **Axe 3 thématique – Productions végétales et animales**
  - 3.A. Connaître, comprendre et développer les technologies et les méthodologies pour une gestion durable des sols agricoles, forestiers, naturels et de jardin
  - 3.B. Prévenir les dégradations des sols agricoles, forestiers, naturels et de jardin et préserver ou optimiser les services qu'ils rendent
- **Axe 4 thématique – Contamination des sols**
  - 4.A. Connaître et comprendre la pollution des sols, développer et transférer les technologies et méthodologies permettant de la caractériser, de la limiter ou de la traiter
  - 4.B. Prévenir la contamination des sols
  - 4.C. Optimiser les interventions de maîtrise d'ouvrage des sites pollués à responsable défaillant et valoriser le bénéfice apporté par l'action de l'ADEME
  - 4.D. Apporter un soutien à des dispositifs innovants permettant de sécuriser et de généraliser la reconversion des friches et sites pollués dans une perspective d'aménagement
- **Axe 5 transversal – Restauration et valorisation des sols dégradés**
  - 5.A. Développer les technologies pour restaurer et valoriser des sols dégradés
  - 5.B. Diffuser les outils, les pratiques et les technologies et apporter un soutien à des opérations de démonstration visant la re-fonctionnalisation des sols dégradés et l'émergence de filière industrielles

2. Objectifs et périmètre de l'étude

2.1. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de l'étude est de dresser un état des lieux de la recherche sur d'une part, l'impact du changement climatique sur les sols (leurs caractéristiques, leurs fonctions écologiques et les services qu'ils rendent), et d'autre part, le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique.

Les sous-objectifs peuvent être résumés de la manière suivante :

- identifier les principaux programmes et projets de recherche menés sur ces sujets, ainsi que les acteurs concernés par leur mise en œuvre ;
- produire un état des connaissances relatif aux impacts du changement climatique sur les sols ;
- produire un état des connaissances relatif au rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique ;
- identifier les problématiques qui nécessitent davantage de travaux de recherche afin de déterminer un certain nombre de questions et pistes de recherche améliorant l'état des connaissances ;
- définir quelles questions de recherche qui pourraient être portées par l'ADEME dans le cadre de ces différents domaines d'intervention.

Les résultats de l'étude doivent permettre à l'ADEME d'identifier les thématiques pour lesquelles des appels à projets de recherche pourraient être mobilisés, quelles équipes de recherche mobiliser (ou remobiliser) et quels autres financeurs éventuellement solliciter.

2.2. Périmètre de l'étude

Cette partie précise la terminologie permettant de caractériser les impacts du changement climatique sur les sols et le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique selon trois types de périmètres relatifs au sol (sensibilité), au changement climatique (exposition) et aux mesures d'adaptation (capacité d'adaptation).

Le périmètre de l'étude est schématisé sur la page suivante. Une définition pour chaque intitulé du périmètre est précisée en annexe, ainsi que trois schémas illustrant :

- les impacts des facteurs climatiques sur les sols ;
- le passage des caractéristiques des sols à la fourniture de services écosystémiques ;
- la façon dont les mesures d'adaptation influencent les fonctions écologiques des sols et permettent de se prémunir contre les impacts du changement climatique sur les sols.

Périmètre d'étude
Changement climatique
(EXPOSITION)

Facteurs climatiques :
- Augmentation de la température de l'air
- Modification du régime des précipitations
- Augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses
- Modification des gelées et épisodes neigeux
- Augmentation des tempêtes, vents violents, cyclones

Evènements induits :
- Augmentation de la concentration en CO_2 de l'air
- Augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations
- Augmentation du niveau de la mer (submersion)
- Augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies
- Inondations par ruissellement et coulées de boue
- Érosion (éolienne, hydrique, du trait de côte)
- Mouvements et effondrements de terrain
- Retrait-gonflement des argiles
- Salinisation des sols
- Modification de la biodiversité
- Désertification
- Acidification des sols
- Perte d'éléments nutritifs dans les sols

Périmètre d'étude
Sols
(SENSIBILITE)

Types de milieux :
- Naturels
- Agricoles
- Forêts
- Prairies
- Zones semi-humides
- Zones urbaines

Caractéristiques des sols :
- Texture
- Structure
- Teneur en MO
- Teneur nutrim.
- Humidité/saturation
- pH
- Organismes vivants
- Teneur en CO_2
- Température

Fonctions écologiques :
- Filtration et épuration de l'eau
- Infiltration et rétention de l'eau
- Support de la végétation & production de biomasse
- Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques (prédation, parasitisme, compétition)
- Régulation des cycles biogéochimiques (décomposition MO, recyclage éléments nutritifs…)
- Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphériques (échanges gazeux végétaux- atmosphère, processus influencés par la biologie, albédo/réflexion…)

Services écosystémiques
- Approvisionnement en aliments, fibres, énergie
- Approvisionnement en matériaux
- Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie
- Support pour les habitations et infrastructures
- Purification et maintien de la qualité de l'air
- Purification et maintien de la qualité de l'eau
- Régulation du climat des villes et des bâtiments (régulation des ICU et régulation thermique des bâtiments)
- Atténuation du changement climatique (stockage du carbone)
- Régulation des flux d'eau (Régulation des risques d'inondations, Gestion des eaux de ruissellement urbaines et Approvisionnement en eau)
- Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées
- Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable
- Services culturels
- Aide des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux sécheresses

Périmètre d'étude
Mesures d'adaptation
(CAPACITE D'ADAPTATION)

Mesures d'adaptation pour les sols agricoles, forestiers et naturels :
- Travail du sol
- Dispositifs externes d'apport et de maintien de l'humidité des sols
- Choix d'espèces et de variétés
- Infrastructures agroécologiques
- Assolement et rotation
- Modes de production
- Couverture du sol

Mesures d'adaptation pour les sols urbains :
- Végétalisation des espaces urbains
- Végétalisation des bâtiments
- Perméabilisation des revêtements urbains
- Construction de digues
- Équipements de production d'énergies renouvelables

Figure 9 : Présentation du périmètre de l'étude

3. Méthodologie employée

3.1. Comité d'Orientation Technique

Le Comité d'Orientation Technique, composé d'experts du sol, du changement climatique et de la recherche, a eu une fonction ressource pour la réalisation de l'état des lieux et la réalisation de l'analyse bibliographique. Il s'est réuni à deux reprises au cours de l'étude :

- Une première fois pour valider et approfondir les résultats issus de l'état des connaissances ;
- Une seconde fois afin de proposer et valider des questions et pistes de recherche permettant l'approfondissement des connaissances.

Le Tableau 3 présente la liste des membres du Comité d'Orientation Technique :

Structures	Membres
AgroParisTech	Claire CHENU
AgroParisTech	Jean-Claude GÉGOUT
Agence Nationale de la Recherche (ANR)	Christine KING
Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC)	Nicolas BÉRIOT
Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA)	Eric MARTIN
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)	Katia CHANCIBAULT

Tableau 3 : Composition des membres du Comité d'Orientation Technique

3.2. Revue bibliographique

Cette étude donne un bon aperçu de l'état des connaissances sur le sujet, mais n'est pas basée sur une revue bibliographique exhaustive, dans la mesure où le temps imparti à la réalisation de l'étude était limité.

La revue bibliographique a été effectuée en langues française et anglaise à partir des moteurs de recherche dédiés aux publications scientifiques (Google Scholar, Science Direct, Scopus), ainsi que des sites de conférence. Cette revue a été complétée par une liste de publications clés fournie d'une part par l'ADEME suite à la réalisation d'une étude bibliométrique datant de 2015 (et ayant mis en évidence plus de 15 000 publications scientifiques traitant des sols, de l'impact du changement climatique et de l'adaptation au changement climatique), et d'autre part par les experts présents dans le groupement ayant réalisé l'étude.

L'analyse bibliographique a consisté en l'analyse des résumés de **123 documents**. Le corpus analysé est présenté en annexe.

3.3. Entretiens avec les experts

Des entretiens téléphoniques ont été réalisés avec des acteurs experts de la recherche sur les sols et/ou l'adaptation au changement climatique, représentatifs des différents milieux analysés (agricoles, forestiers, urbains…). Ces entretiens avaient pour objectif la vision des scientifiques sur le thème de l'étude et d'identifier les besoins majeurs de connaissance.

Domaine d'expertise	Interlocuteur	Structure
Sols en général	Luca MONTANARELLA	Joint Research Centre (JRC)
	Christian VALENTIN	Institut de Recherche pour le Développement (IRD) / Allenvi
Sols agricoles	Isabelle COUSIN	Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
	Aubert MICHAUD	Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA)
	Alexandre MEYBECK	Food and Agriculture Organization (FAO)
	Martial BERNOUX	Food and Agriculture Organization (FAO)
	François LAFOLIE	Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
Sols viticoles	Joël ROCHARD	Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV)
Sols forestiers	Guy LANDMANN	Groupement d'Intérêt Public Ecosystèmes forestiers (ECOFOR)
	Jacques RANGER	Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
Sols urbains	Aude LEMONSU	Centre National des Recherches Météorologiques (CNRM)
	Olivier DAMAS	Plante & Cité
	Gilles GRANDJEAN	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
	Jean-Louis MOREL	Laboratoire Sols et environnement, Université de Lorraine
	Christophe SCHWARTZ	Laboratoire Sols et environnement, Université de Lorraine

Tableau 4 : Liste des experts interrogés au cours d'entretiens téléphoniques

3.4. Identification des acteurs, des programmes et des projets de recherche traitant des questions de changement climatique et des sols

L'analyse des publications et des sites internet dédiés aux programmes de recherche a permis d'identifier les acteurs au niveau national et européen susceptibles de développer la recherche sur les sols et le changement climatique ainsi que les projets et programmes de recherche terminés ou en cours.

Parmi ces projets et programmes de recherche, dix ont fait l'objet d'une monographie détaillant les partenaires, les objectifs et résultats du projet, quelques publications clés, ainsi que des ressources pour aller plus loin (annexe 3).

3.5. Production de matrices synthétisant le besoin d'approfondissement des connaissances

La méthode suivante a été développée afin de réaliser l'état des lieux des connaissances et de déterminer en creux les besoins de connaissance concernant l'impact du changement climatique sur les sols et le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique :

1. La production d'une matrice traduisant **l'état des connaissances** sur les deux sujets, basée sur l'étude du nombre de publications traitant de chaque thématique ;
2. La production d'une matrice traduisant la notion de **degré** d'impact du changement climatique sur les sols ou de contribution du sol à l'adaptation au changement climatique ;
3. La production d'une matrice des **enjeux en termes d'approfondissement des connaissances** sur les deux sujets, à travers la combinaison des deux matrices précédents (c'est-à-dire que si une thématique présente un fort degré d'impact mais que l'état des connaissances est faible, alors le besoin d'approfondissement des connaissances sera élevé).

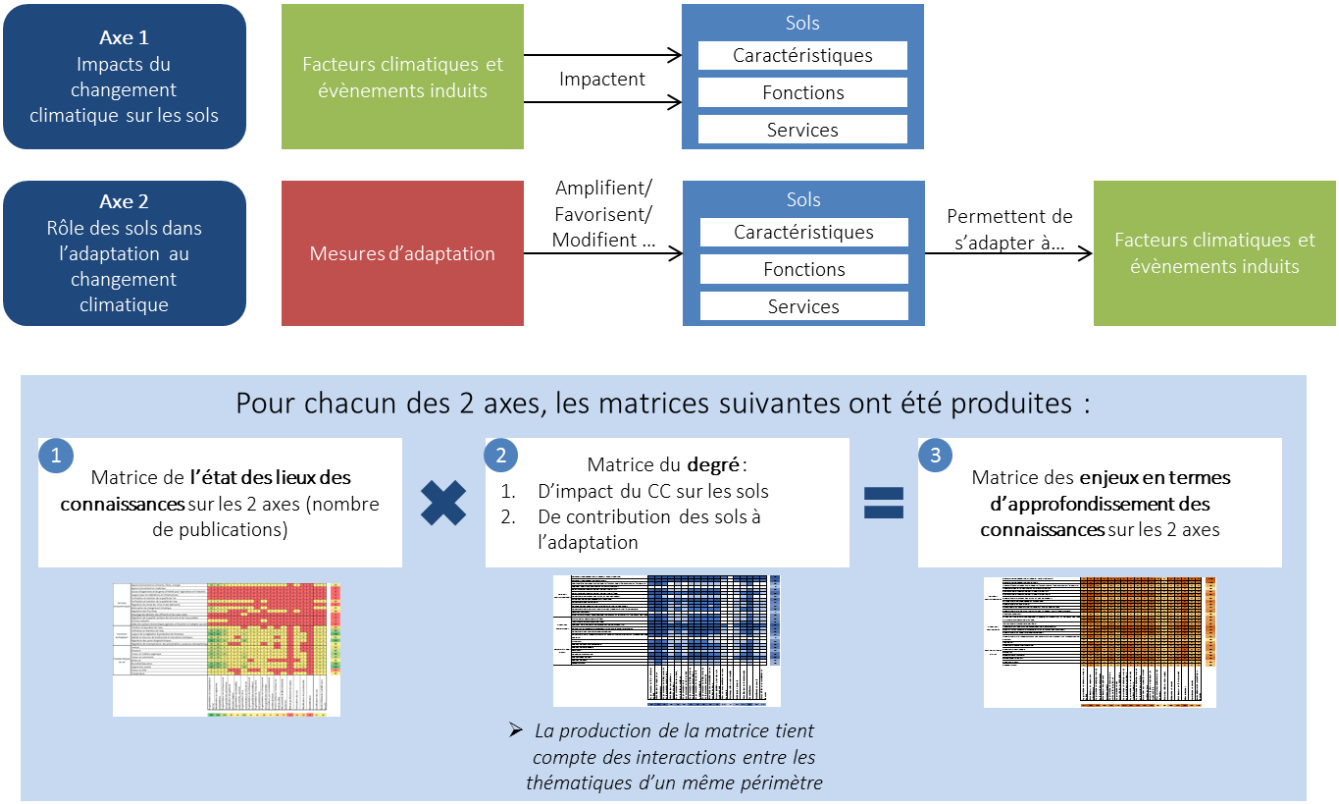


Figure 10 : Méthode des matrices de connaissance

Les différentes matrices produites ont été complétées par les éléments obtenus au cours des entretiens avec les experts et soumis à discussion lors des comités de pilotage et comités d'orientation technique.

NB : Etant donné que l'analyse de l'état des connaissances a été réalisée sur un échantillon restreint de documents (pour rappel 123 publications), une vérification de la représentativité des résultats obtenus a été faite à partir d'une analyse simplifiée des 15 000 publications issues de l'étude bibliométrique. Les ordres de grandeur relatifs obtenus par cette vérification sont cohérents avec les résultats des matrices.

3.6. Identification de questions et pistes de recherche

La liste des questions et pistes de recherche a été construite à partir de deux sources : les entretiens avec les experts ainsi qu'une réunion avec les membres du comité d'orientation technique. Les différents besoins d'approfondissement des connaissances et pistes de recherche ainsi obtenus ont ensuite été compilées afin de faire émerger des questions de recherche déclinées en pistes.

Ces pistes ont été catégorisées selon la thématique technique abordée, le type de milieu concerné et leur type d'objectif : **Création des connaissances (C), Approfondissement des connaissances (A) et Transfert des connaissances(T)**.

4. Les acteurs, programmes et projets de recherche traitant des questions de changement climatique et de sols

4.1. Les principaux acteurs recensés au niveau national

L'analyse des publications et des sites internet dédiés aux programmes de recherche terminés ou en cours a permis d'identifier les principales structures françaises susceptibles de développer la recherche sur les sols et le changement climatique (bailleurs/financeurs et acteurs de la recherche). Ces structures ont été classées selon leur grande spécificité de recherche : agronomie-agriculture-forêt, climat-météorologie, structures et réseaux hydriques ou transverse.

Acronyme	Structures
Bailleurs / financeurs	
MAAF	Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ANR	Agence Nationale de la Recherche
GIP ECOFOR	Groupement d'Intérêt Public Ecosystèmes forestiers
Acteurs de la recherche : Agronomie – Agriculture - Forêt	
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
Ecoles Agro.	AgroParisTech, Montpellier Supagro, ENSAIA, INP-ENSAT
IEES	Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris
Acteurs de la recherche : Climat – météorologie	
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
/	Météo-France
Acteurs de la recherche : Structures – réseaux hydriques	
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Acteurs de la recherche : Transverse	
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CIRED	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
GET	Géosciences Environnement Toulouse
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IRSTEA	Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
UPS	Université Paris-Sud XI, Faculté d'Orsay (LSCE/CEA)

Tableau 5 : Les principaux acteurs français de la recherche sur les sols et le changement climatique

4.2. Les programmes et projets de recherche traitant des sols et du changement climatique

4.2.1. Les principaux programmes de recherche identifiés au niveau européen

Dix programmes de recherche européens ont été recensés en tant que programmes permettant d'apporter de **nouvelles connaissances à la fois sur les champs du sol et du changement climatique**. Plusieurs d'entre eux sont encore en cours et permettent chaque année de développer de nouveaux projets de recherche.

Structures	Pays	Programmes de recherche
ANR	France	Ville Durable
		Changements environnementaux planétaires et sociétés
		Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés
INRA	France	Méta-programme « Adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique » (ACCAF)
MAAF	France	Programme 4 pour 1000
MEEM, MAAF, INRA, ADEME, IRD, Information Géographique et forestière (IGN)	France	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol)
ADEME	France	Programme REACCTIF[8] 2013 - 2016 (fusionné depuis 2016 avec 3 autres programmes de R&D dans le programme GRAINE[9]) comprenant de nombreux projets sur le rôle du sol dans l'atténuation du changement climatique.
Climate and Energy Fund	Autriche	Austrian Climate Research Program (ACRP)
Federal Ministry of Food and Agriculture of Germany, Ministry for foreign affairs of Finland et Norwegian Ministry of foreign affairs, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO)	Allemagne Finlande Norvège	Programme d'atténuation du changement climatique dans l'agriculture (MICCA)
Commission Européenne	Europe	EU's framework program for research and technological development (ARIMNet et ARIMNet2) / Central Europe Program
		LIFE multiannual work program for 2014-2017

Tableau 6 : Les principaux programmes de recherche traitant du sol et du changement climatique

Outre ces programmes traitant conjointement des thématiques sols et changement climatique, certains programmes permettent de développer des projets sur l'une ou l'autre thématique :

- Plusieurs programmes sont centrés sur l'étude des sols :
  - Le programme GESSOL (Fonctions environnementales des sols – Gestion du patrimoine sol) porté par le MEEM et ADEME entre 1998 et 2015 était focalisé sur l'analyse des sols ;
  - Les appels à projets génériques de l'ANR 2014, 2015 et actuellement 2016 appellent à des propositions sur les sols (2 à 4 projets par an), avec notamment quelques

[8] REcherche sur l'Atténuation du Changement ClimaTique par l'Agriculture et la Forêt
[9] Gérer, produire, valoriser les biomasses : pour une bioéconomie au service de la transition écologique et énergétique

programmes spécifiques inscrits dans le défi 1 « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique »:

- *Comprendre et prévoir les évolutions de notre environnement*
- *Innovation technologique pour analyser, remédier ou réduire les risques environnementaux*

- Plusieurs programmes sont centrés sur l'étude des changements climatiques :
  - Le programme GIP-ECOFOR - GICC « Gestion et Impacts du Changement Climatique » (MEEM, ADEME et ONERC) se focalise depuis 1999 surtout sur le développement des connaissances en appui aux politiques publiques en considérant les changements climatiques sous l'angle aussi bien de leurs impacts, de l'adaptation pour y faire face que des mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre ;
  - L'initiative de programmation conjointe sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique (FACCE-JPI) définit depuis 2010 les priorités de recherche pertinentes sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique en Europe.

Le programme H2020, programme européen pour la recherche et le développement pour la période 2014-2020, ne traite pas pour le moment de la thématique « sol et changement climatique ». Il comporte cependant un défi « Climat, efficacité des ressources et matières premières » dans lequel cette thématique pourrait être intégrée.

4.2.2. Les principaux projets de recherche

Les programmes identifiés dans le chapitre précédent ont donné lieu à différents projets de recherche (Figure 11).

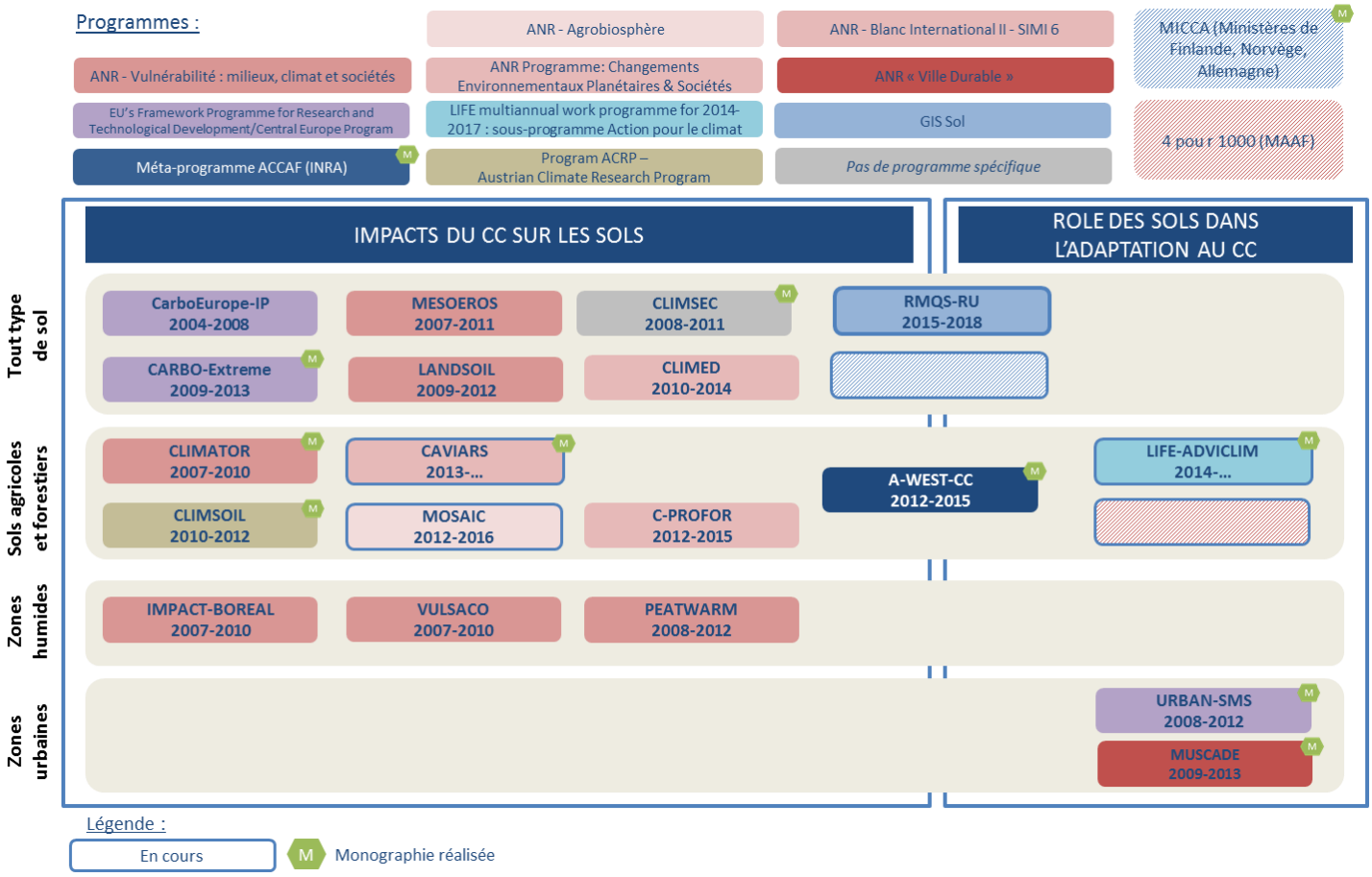


Figure 11 : Les projets de recherche traitant des sols et des changements climatiques

4.2.3. Les projets de recherche achevés

Parmi les projets illustrés en Figure 11, les projets suivants sont achevés :

Bailleur	Nom	Milieu	Objectifs
Projets de recherche étudiant les impacts du changement climatique sur les sols			
EU's 6th Framework Programme for Research and Technological Development 2002-2006	CarboEurope-IP Comprendre et quantifi er le bilan de carbone du continent européen (2004-2008)	Tout type de sol	Quantifier les flux de carbone terrestres européens en faisant avancer la compréhension d'une manière intégrée et multidisciplinaire
EU's 7th Framework Programme for Research and Technological Development 2007-2013	CARBO-Extreme Le cycle du carbone terrestre dans la variabilité climatique et les épisodes extrêmes (2009-2013)	Tout type de sol	Déterminer la relation entre les évènements climatiques extrêmes et les changements dans le budget carbone des terres émergées européennes
ANR Vulnérabilité : Milieux et Climat, 2006	MESOEROS Erosion des sols méditerranéens et vulnérabilité au changement global (2007-2011)	Tout type de sol	Evaluer l'impact des changements climatiques et d'occupation des sols attendus au cours du 21ème siècle, sur l'érosion des sols dans le domaine méditerranéen, et développer des modèles et des indicateurs pour évaluer localement et régionalement leur vulnérabilité
ANR Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés, 2006	LANDSOIL : structure du paysage et conservation des sols (2009-2012)	Tout type de sol	Etudier les relations entre l'évolution des sols agricoles et celle du contexte climatique et de l'organisation des paysages, à des échelles de temps allant de la décennie au siècle. Quantifier et modéliser les effets de la structure du paysage sur la redistribution des sols et sur la dynamique du stockage de carbone dans les sols
/	CLIMSEC L'impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol en France (2008-2011)	Tout type de sol	Etudier l'évolution passée et future des réserves d'eau des couches superficielles des sols, avec un accent sur la définition et la mise en œuvre d'indicateurs de sècheresse permettant de caractériser la typologie de ces événements
ANR Changements environnementaux planétaires, 2009	CLIMED Impact des changements climatiques sur la biodiversité et conséquences pour le fonctionnement d'un écosystème méditerranéen (2010-2014)	Tout type de sol	Faire le lien entre changements climatiques et changements de la biodiversité (y compris organismes du sol) et à quantifier les effets de ces changements sur les cycles du carbone et des nutriments dans un écosystème Méditerranéen
ANR	CLIMATOR Elaboration d'outils et de	Sols agricoles	Fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la

Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés, 2006	références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement climatique (2007-2010)		parcelle, et dans des climats contrastés français
Program ACRP – Austrian Climate Research Program, 2010-2012	CLIMSOIL Revue des informations existantes sur les interrelations entre sol et changement climatique (2010-2012)	Sols agricoles	Construire une base de données SIG et une méthodologie pour estimer les impacts du changement climatique sur les températures du sol et mettre en évidence les risques pour l'agriculture en Autriche
ANR Blanc International II - SIMI 6 - Système Terre, environnement, risques (Blanc Inter II - SIMI 6) Edition 2012	C-PROFOR Modélisation de la dynamique du carbone profond des sols forestiers équatoriaux dans des environnements changeants (2012-2015)	Sols forestiers	Connaître la dynamique de l'eau dans les podzols soumis à aux changements considérés, ainsi que la quantification de la minéralisation des matières organiques des podzols sous différents régimes d'humectation/dessication puis modéliser le stock de carbone des podzols.
Méta-programme « Adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique » (ACCAF)	A-WEST-CC Le Potentiel Agricole des Sols du Sud-Ouest Sibérien lié au Changement Climatique (2012-2015)	Sols agricoles	Evaluer les opportunités et les risques associés au développement de l'agriculture dans les plaines de Sibérie occidentale dans le contexte du changement climatique en cours Analyser comment la neige, limitant le gel des sols, va modifier les flux d'eau, la décomposition de la matière organique, le taux de libération des éléments nutritifs de la litière et finalement la fertilité des sols
ANR Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés, 2006	IMPACT-BOREAL Impact du climat sur l'hydrologie et la production de méthane dans les sols anaérobies des régions boréales (2007-2010)	Zones humides	Améliorer les modèles hydrologiques et biogéochimiques, pour quantifier l'impact du changement climatique sur la distribution des zones inondées et la production de CH_4 associée
ANR Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés, 2006	VULSACO Vulnérabilité des plages sableuses face aux changements climatiques et pressions anthropiques (2007-2010)	Zones humides	Analyser la vulnérabilité physique (érosion), des côtes sableuses basses face au changement climatique à échéance 2030 : définition d'indicateurs reflétant cette vulnérabilité et rôle du facteur humain sur cette vulnérabilité
ANR Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés, 2006	PEATWARM Impact du réchauffement climatique sur la	Zones humides	Elaborer un modèle biogéochimique du C prenant en compte les interactions et visant à extrapoler l'évolution du système sur les deux prochaines décennies.

	focntion de puits de carbone de l'ecosysteme tourbières à sphaignes (2008-2012)		
Projets de recherche étudiant le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique			
Central Europe Programme 2007-2013	URBAN SMS Stratégie de gestion des sols urbains (2008-2012)	Sols urbains	Développer et mettre en place une stratégie de gestion des sols complète pour les municipalités d'Europe centrale afin d'aider les urbanistes à considérer la valeur des sols et de leurs différentes fonctions au sein du processus de planification
ANR Ville Durable, 2009	MUSCADE Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique (2009-2013)	Sols urbains	Etudier les interactions entre différents processus (la végétalisation des toits, la forme urbaine, le verdissement de la ville) et proposer des stratégies d'adaptation qui mettent en perspective la consommation énergétique de la ville et ses capacités de production d'énergie

Tableau 7 : Les projets de recherche achevés

4.2.4. Les projets de recherche en cours

Les projets de recherche en cours présentés sur la Figure 11 sont les suivants :

Bailleur	Nom	Secteur	Description
Projets de recherche étudiant les impacts du changement climatique sur les sols			
Groupement d'intérêt scientifique GIS Sol (2001-…)	Projet RMQS-RU Analyses granulométriques et traitement de données pour améliorer les estimations de RU sur les sites RMQS et la France métropolitaine	Tout type de sol	Produire de nouvelles estimations de la réserve utile des sols de France et y associer des incertitudes. Ce projet s'inscrit donc dans les enjeux portés par l'ADEME, en particulier les travaux visant à améliorer les méthodologies de comptabilisation des missions/ captation des émissions de CO_2 ou de N_2O dans un contexte d'évolution des modes de gestion des milieux et du climat et à optimiser les stratégies agricoles et forestières d'adaptation au changement climatique
MICCA Atténuation du Changement Climatique dans l'Agriculture (2010-…)	Initiative sur les sols organiques et les tourbières et l'atténuation du changement climatique, 2012 (il s'agit d'une initiative de la FAO majoritairement centrée sur l'atténuation pour le moment)	Sols organiques	Développer les compétences des parties prenantes pour leur permettre de travailler sur des inventaires nationaux de GES dans le secteur agricole en utilisant les pratiques mises en œuvre dans le cadre d'une agriculture intelligente face au climat

ANR Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés, 2012	CAVIARS Climat, Agriculture et Végétation : Impacts sur l'érosion éolienne au Sahel (2013-…)	Sols agricoles	Quantifier la variabilité de l'érosion éolienne dans la zone sahélienne en lien avec les conditions climatiques et l'évolution de l'utilisation des sols au cours des 50 dernières années Modéliser la végétation naturelle et cultivée et de ses impacts sur les seuils et les flux d'érosion éolienne au Sahel
ANR Viabilité et adaptation des écosystèmes productifs, territoires et ressources face aux changements globaux (Agrobiosphere)	MOSAIC 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 (2012-2016)	Sols agricoles	Etudier la dynamique des MOS (stocks et flux associés) dans un paysage d'agriculture intensive dominée par l'élevage, et les impacts des changements globaux sur la résilience de la MOS et des systèmes de culture.
Projets de recherche étudiant le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique			
LIFE multiannual work programme for 2014-2017	LIFE- ADVICLIM Adaptation de la viticulture au changement climatique (2014-…)	Sols viticoles	Etudier des scenarii d'adaptation et d'atténuation, à l'échelle des terroirs viticoles, pour différents vignobles représentatifs de la diversité climatique des régions viticoles européennes
«Quatre pour Mille » (2015-…)	En attente	Sols agricoles	Fédérer tous les acteurs volontaires du public et du privé afin de les inciter à s'engager dans une transition vers une agriculture productive, hautement résiliente, fondée sur une gestion adaptée des terres et des sols, créatrice d'emplois et de revenus et ainsi porteuse de développement durable

Tableau 8 : Les projets de recherche en cours

Parmi les projets listés en 3.2.3 et 3.2.4, dix ont fait l'objet d'une monographie détaillant : les partenaires, les objectifs et résultats du projet, quelques publications clés, ainsi que des ressources pour aller plus loin. Lorsque le contexte s'y prêtait, la monographie a été réalisée sur le programme de recherche (Métaprogramme ACCAF et programme MICCA). Les monographies, présentées en annexe 3, portent sur :

Projets :

- **CARBO-EXTREME**: EU's 7th Framework Programme for Research and Technological Development ;
- **CLIMSEC**: Fondation MAIF ;
- **CLIMATOR** : Agence Nationale de la Recherche (ANR) ;
- **CLIMSOIL** : Austrian Climate Research Programme (ACRP) ;
- **URBAN-SMS** : European Regional Development Fund (ERDF), Central Europe Programme ;
- **MUSCADE** : Agence Nationale de la Recherche (ANR) ;
- **CAVIARS** : Agence Nationale de la Recherche (ANR) ;
- **LIFE-ADVICLIM**: LIFE multiannual work programme for 2014-2017.

Programmes:

- **Méta-programme ACCAF**: Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA) ;
- **Programme MICCA**: Federal Ministry of Food and Agriculture of Germany, Ministry for foreign affairs of Finland et Norwegian Ministry of foreign affairs, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).

5. Impacts du changement climatique sur les sols

5.1. L'état des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols

L'analyse de la bibliographie, les entretiens avec les experts et la réalisation de la cartographie de l'état des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols, ont permis de mettre en exergue plusieurs observations portant sur le périmètre « sols » et le périmètre « changement climatique ».

- **Périmètre « Sols »**

L'état des connaissances a démontré un nombre important de travaux sur la compréhension des impacts du changement climatique sur les **caractéristiques du sol** (structure, humidité, teneur en matière organique…). Comme le montre le faible nombre de publications recensées sur la Figure 13, les **fonctions écologiques** et **les services écosystémiques** ne sont pas directement étudiés mais seulement évoqués en tant que conséquences des modifications des caractéristiques des sols.

En effet, les publications portent, par exemple, sur la perte de l'humidité du sol liée à la hausse des températures. La structure du sol pouvant être modifiée, ce phénomène aura ensuite un impact indirect sur la fonction support de la végétation du sol.

De l'analyse bibliographique ressort un nombre important de publications centrées sur l'étude du changement climatique sur l'**humidité des sols (40% des publications étudiées)** et **les organismes vivants des sols (35% des publications étudiées)**. D'après la cartographie ci-dessous (Fig.13) représentant l'état des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols, les impacts du changement climatique sur la **teneur en CO_2,** le **pH** et la **température du sol** semblent encore peu étudiés.

Par ailleurs, les publications étudiées concernent à 39% les **milieux agricoles**, à 13% les **forêts** et à 11% les **zones urbaines**. A noter que les études des impacts du changement climatique sur les sols viticoles et forestiers portent plutôt sur les impacts du changement climatique sur la végétation (vigne et forêt) que sur le sol en tant que tel.

- **Périmètre « Changement climatique »**

L'état des connaissances a mis en évidence des publications pour la plupart centrées sur l'étude des effets « primaires » tels que les **températures de l'air (62%)** et **des précipitations (49%)** et a révélé très peu de publications sur les évènements de type coulées de boue, mouvements et effondrements de terrain et évolution des éléments pathogènes (impacts indirects ou induits). Aucune publication portant spécifiquement sur la thématique retrait-gonflement de l'argile ou désertification n'a été identifiée dans le corpus. Ces phénomènes induits sont souvent évoqués en tant que conséquences des autres paramètres climatiques, notamment des précipitations et des températures.

Par ailleurs, les entretiens avec les experts ont permis d'identifier plusieurs sujets bien étudiés, et notamment :

- L'étude de la microbiologie des sols viticoles (développement des microorganismes dans les vignes) ;
- La cartographie du potentiel de fertilité actuelle des sols forestiers en vue d'étudier l'impact du changement climatique ;
- Le suivi temporel des sols forestiers : il existe aujourd'hui un suivi analytique des sols qui a lieu tous les 10 ans permettant d'identifier les disfonctionnements et de suivre dans le temps l'évolution des caractéristiques physiques du sol.

		Augmentation de la température de l'air	Modification du régime des précipitations	Augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses	Modification des gelées et épisodes neigeux	Augmentation des tempêtes, vents violents, cyclones	Augmentation de la concentration en CO2 de l'air	Augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations	Augmentation du niveau de la mer (submersion)	Augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies	Inondations par ruissellement et coulées de boue	Erosion (éolienne, hydrique, du trait de côte)	Mouvements et effondrements de terrain	Retrait-gonflement des argiles	Salinisation des sols	Modification de la biodiversité	Désertification	Acidification des sols	Perte d'éléments nutritifs dans les sols	
Services écosystémiques	Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	13	10	6	1	1	2	1	2	1	2	3	2	0	3	0	0	2	3	52
	Approvisionnement en matériaux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Support pour les habitations et infrastructures	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Purification et maintien de la qualité de l'air	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Purification et maintien de la qualité de l'eau	5	5	4	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	24
	Régulation du climat des villes et des bâtiments	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Atténuation du changement climatique	12	4	5	1	2	8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	37
	Régulation des flux d'eau	9	5	4	0	0	0	2	2	0	2	1	2	0	1	0	0	0	0	28
	Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Services culturels	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	Aides des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux séch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fonctions écologiques	Filtration et épuration de l'eau	5	4	3	1	1	0	2	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	3	24
	Infiltration et rétention de l'eau	19	21	12	1	3	4	5	5	2	5	4	3	0	2	0	0	4	4	94
	Support de la végétation & production de biomasse	33	30	14	2	3	9	3	4	2	5	5	3	0	4	3	0	5	5	130
	Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques	12	10	7	1	0	5	1	2	1	1	0	1	0	1	6	0	2	1	51
	Régulation des cycles biogéochimiques	35	23	15	3	3	18	3	3	2	4	4	1	0	1	2	0	4	4	125
	Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphérique	10	10	4	0	0	2	2	2	0	2	0	1	0	1	0	0	3	2	39
Caractéristiques du sol	Texture	11	13	6	2	2	3	1	1	2	1	0	1	0	1	0	0	4	5	53
	Structure	12	11	7	2	3	3	2	4	1	3	2	3	0	3	0	0	4	4	64
	Teneur en matière organique	21	15	10	2	3	9	2	4	2	3	2	3	0	3	1	0	5	5	90
	Teneur en nutriments	15	13	7	2	2	10	1	3	3	2	2	2	0	3	1	0	5	6	77
	pH du sol	7	7	5	1	2	3	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	3	3	35
	Humidité/Saturation	23	25	13	3	2	8	4	3	3	3	2	1	0	1	3	0	5	5	104
	Organismes vivants	30	24	15	4	3	16	2	3	3	2	3	2	0	2	6	0	5	5	125
	Teneur en CO2	3	2	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	11
	Température	7	5	4	2	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	2	2	30
		283	238	144	29	32	104	34	41	29	37	28	27	0	28	24	0	57	63	

Importance croissante du nombre de publications

Figure 12 : Cartographie de l'état des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols

5.2. Le degré d'impact du changement climatique sur les sols

L'analyse de la bibliographie et les entretiens avec les experts ont permis d'identifier le degré d'impact du changement climatique sur les sols.

Il a été difficile de distinguer les impacts *stricto sensu* du changement climatique sur les sols des impacts de l'occupation des sols, de l'aménagement urbain ou des modes de gestion appliqués aux sols. L'impact du changement climatique sur les systèmes d'exploitation et les pratiques agricoles et les évolutions de l'utilisation des terres affectent également les sols.

- **Périmètre « Sols »**

Du point de vue du périmètre « Sols », le changement climatique a un **impact direct sur les caractéristiques des sols** (structure, organismes vivants, teneur en eau…). Ces impacts directs perturbent ensuite les fonctions écologiques et les services écosystémiques que les sols fournissent. En effet, une augmentation des précipitations en milieu urbain peut entrainer un engorgement du sol en eau et une modification de sa structure. Le sol sera ainsi moins portant et le service rendu, ici support des bâtiments, sera affecté de manière indirecte.

Comme illustré par la cartographie ci-dessous (Fig.14), un des principaux enjeux liés aux sols en France métropolitaine est la réduction des précipitations et l'augmentation des températures qui favorisent l'augmentation de l'**évapotranspiration** des sols et des végétaux **(humidité/saturation)**.

Le changement climatique affecte l'activité des **organismes vivants**, ainsi que les **teneurs en matière organique** (cycle du carbone). Le changement climatique augmente la **vulnérabilité des sols au lessivage de l'azote**, notamment en cas d'irrigation et de drainage puisque les drains favorisent l'exportation de l'azote, engendrant des pertes de rendement. La dynamique de l'azote est affectée, notamment la nitrification ou la production d'oxyde d'azote.

Certaines **caractéristiques chimiques** comme les teneurs en calcium (Ca) et magnésium (Mg) seront impactées par le changement climatique. En effet, l'augmentation des précipitations ou l'augmentation de l'irrigation risque d'entrainer plus d'alcalins et d'alcalino-terreux hors du sol et donc de modifier la capacité des sols à supporter la végétation. L'évolution du pH quant à elle, sera liée à l'évolution de la distribution des pluies. Une très forte augmentation des précipitations génèrera un fort lessivage, pouvant occasionner, à très long terme une acidification du sol.

Ainsi, en termes de fonctions écologiques et de services écosystémiques, les plus impactés par le changement climatique sont ceux liés au sol en tant que **support de végétation**, de **biodiversité**, ainsi que ceux liés au **cycle de l'eau** et au **cycle du carbone.**

- **Périmètre « Changement climatique »**

La cartographie ci-dessous (Figu.14) illustre à la fois l'intensité de certains facteurs climatiques et évènements induits et l'intensité d'évènements impactant de manière significative les sols.

La **hausse de la température** impacte notamment de manière importante les sols de montagne (comparé à des sols en plaine). En effet, elle entraine une accélération de la fonte des neiges et accentue le ruissellement et l'érosion des sols. De même, elle accélère la fonte des glaciers et donc accentue **l'élévation du niveau de la mer,** entrainant **un recul de la côte** et une **salinisation des sols** côtiers et des aquifères d'eau douce à proximité.

La **sécheresse** joue sur les mouvements des sols (retrait-gonflement) et impacte de manière significative les infrastructures en milieu urbain (en créant des mouvements des surfaces). De même, elle affecte la teneur en eau des sols et donc indirectement la capacité d'évapotranspiration de la végétation sus-jacente. De plus, le risque de feux de forêts est accru en raison de la sécheresse ce qui peut notamment influencer le taux de matière organique dans le sol.

Le changement climatique modifie la **distribution et l'intensité des précipitations** qui accélèrent le **ruissellement et l'érosion**. Ce qui est déterminant, ce n'est pas tant l'intensité des précipitations qui sont supérieures à la capacité d'infiltration des sols, il s'agit surtout de la saturation du sol entraînant un ruissellement de surface variable selon son état de saturation. Le ruissellement est donc plus important lors des périodes de recharge des nappes phréatiques que lors de périodes plus sèches. L'évolution du

cumul des précipitations et de leur distribution, associées à des épisodes extrêmes, augmenteront à l'avenir les risques de débordements de réseaux de canalisations et affecteront davantage les sols urbains, qui sont en majorité imperméabilisés.

Le **changement de la distribution des pluies et de la température** affecte le contenu en matière organique, en particulier dans les sols stockant une quantité importante de matière organique (tourbières). En cas de **changement de températures**, une grande partie de ce carbone est minéralisée et entraine des émissions de CO_2 et de méthane.

La France n'est pas, pour le moment, concernée par la **salinisation** du sol liée à l'irrigation, mais il s'agit d'un problème récurrent dans d'autres pays (ex : en Afrique du Sud et en Australie). Mal conduite, l'irrigation peut avoir des conséquences dramatiques sur les sols, surtout dans les régions au climat sec et chaud où l'on irrigue toute l'année. En effet, si l'eau d'irrigation n'est pas drainée, elle stagne dans les champs, et s'évapore lentement, laissant en dépôt les sels dissous qu'elle contient. Cet excès de sels stérilise progressivement les terres qui doivent être abandonnées. Les régions viticoles françaises potentiellement concernées seront notamment la Camargue et le Médoc.

L'**augmentation de la concentration en CO_2** dans l'air impacte positivement la productivité des systèmes agricoles actuels, tant que l'eau du sol ne représente pas un facteur limitant de croissance.

Enfin, le changement climatique aura probablement un effet envisageable sur le type de pathogènes, maladies et ravageurs présents dans les sols, à cause de la **migration** de ceux-ci provenant d'autres régions ou sur l'arrivée de nouveaux pathogènes sur une région donnée.

		Augmentation de la température de l'air	Modification du régime des précipitations	Augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses	Modification des gelées et épisodes neigeux	Augmentation des tempêtes, vents violents, cyclones	Augmentation de la concentration en CO2 de l'air	Augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations	Augmentation du niveau de la mer (submersion)	Augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies	Inondations par ruissellement et coulées de boue	Erosion (éolienne, hydrique, du trait de côte)	Mouvements et effondrements de terrain	Retrait-gonflement des argiles	Salinisation des sols	Modification de la biodiversité	Désertification	Acidification des sols	Perte d'éléments nutritifs dans les sols	
Services écosystémiques	Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2		3	3	3	3	3	50
	Approvisionnement en matériaux	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1		2	3	3	2	2	46
	Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	2	3	2		1		1	1	1	1	1				1	2			16
	Support pour les habitations et infrastructures																			0
	Purification et maintien de la qualité de l'air	2	3	2	1	1	1	2	2	2	2	2			1	1	2	1	1	26
	Purification et maintien de la qualité de l'eau	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	1		1	2	3	2	1	40
	Régulation du climat des villes et des bâtiments	2	3	1		1		1	1	1	1	1				1	2			15
	Atténuation du changement climatique	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	3	1		1	2	3	1	1	38
	Régulation des flux d'eau	3	3	2	1	2	1	2	2	2	2	2			1	1	3	1	1	29
	Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	2	3	2	1	1	1	2	2	2	1	2			1	1	2	1	1	25
	Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	3	3	3	1	2	1	2	2	2	2	2			1	2	3	1	1	31
	Services culturels		1														1			2
	Aides des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux séch	2	3	2	1	1	1	2	2	2	2	2			1	1	2	1	1	26
Fonctions écologiques	Filtration et épuration de l'eau	2	3	2	1	1	1	2	2	2	2	2			1	1	2	1	1	26
	Infiltration et rétention de l'eau	3	3	3	1	2	1	2	2	2	2	2			1	2	3	1	1	31
	Support de la végétation & production de biomasse	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2		2	3	3	3	2	48
	Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	1		1	2	3	2	1	40
	Régulation des cycles biogéochimiques	3	3	3	1	2	1	3	3	3	2	3	1		1	2	3	1	1	36
	Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphérique	2	3	2	1	1	1	2	2	2	1	1			1	1	2	1		23
Caractéristiques du sol	Texture																			0
	Structure	2	3	2	1	1	1	2	2	2	1	1			1	1	2	1		23
	Teneur en matière organique	3	3	3	1	2	1	3	3	3	2	2	1		1	2	3	1	1	34
	Teneur en nutriments	3	3	3	1	2	1	3	3	3	2	2	1		1	2	3	1	1	34
	pH du sol	1	2	1		1		1	1	1	1	1				1	2			13
	Humidité/Saturation	3	3	3	1	2	1	3	3	3	2	2	1		1	2	3	1	1	35
	Organismes vivants	3	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	1		2	3	3	2	2	44
	Teneur en CO2	1	2	1		1		1	1	1	1	1				1	1			12
	Température	1	2	1				1	1	1	1	1					1			10
		61	73	59	30	42	30	56	56	54	48	51	13	0	25	41	63	28	23	

1	2	3

Importance croissante du degré d'impact sur les sols (en blanc : impact nul ou négligeable)

Figure 13 : Cartographie du degré d'impact du changement climatique sur les sols

5.3. L'enjeu d'approfondissement des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols

La production de la matrice ci-dessous des **enjeux en termes d'approfondissement des connaissances** (Fig. 15) sur les deux sujets, issue de la combinaison des deux matrices précédentes, a révélé plusieurs résultats notables :

- **Périmètre « sols »**

L'ensemble des publications semble démontrer un manque de connaissance de la **biodiversité** des sols (microorganismes, pathogènes….) et son évolution au regard du changement climatique. Peu de publications concernent en effet l'étude des pathogènes dans les sols, pour des raisons techniques, avec des difficultés à isoler les organismes vivants en laboratoire. De ce fait, il existe un manque de connaissances de certaines fonctions écologiques qui en résultent, notamment la fonction de **support de la végétation/production de biomasse des sols** et d'**habitat et réservoir de biodiversité/interactions biotiques**.

De plus, la cartographie révèle des besoins d'approfondissement sur la compréhension des **mécanismes de gestion de l'eau des sols** (humidité/saturation, alimentation des végétaux, mais aussi stockage, infiltration…).

Les experts interrogés ont soulevé la question d'améliorer la gestion de la ressource en eau pour les milieux urbains, en réintroduisant des sols naturels et perméables pour faciliter l'infiltration et le stockage de l'eau et limiter les inondations.

Aujourd'hui, il existe un besoin de compréhension de la **dynamique de la matière organique** sous l'effet du changement climatique, en particulier pour les zones à fortes teneurs en matière organique (tourbières…) en lien notamment avec les sécheresses. Jusqu'ici les recherches ont concerné l'effet de l'augmentation de la température sur les matières organiques et moins l'effet des changements de régime hydrique. En fonctionnement naturel, les tourbières sont en général des puits : la végétation forme de la tourbe et l'ensemble des deux est capable de stocker le carbone. En fonctionnement perturbé, elles deviennent des sources émettrices de carbone atmosphérique.

- **Périmètre « Changement climatique »**

L'analyse de la cartographie a démontré un besoin d'approfondissement de connaissances concernant les **précipitations** et les **inondations** pouvant être causées, et leurs impacts sur la structure du sol (et indirectement les impacts sur les fonctions écologiques de filtration et épuration de l'eau des sols).

La cartographie a mis en évidence le besoin de connaissances sur les impacts des **sécheresses** et de la **désertification** sur les fonctions écologiques des sols en tant que support de la végétation et de production de biomasse et habitat pour la biodiversité.

Les entretiens ont confirmé un besoin de connaissances concernant les **effets de l'érosion (hydrique et éolienne)** en lien avec la formation de croûtes superficielles et de la durée de pédogénèse.

Enfin, de manière plus transversale, les entretiens et la cartographie ont révélé le besoin de **suivi et d'observation des sols** et de leur **évolution** sur le long terme, avec des outils de mesure à faibles coûts (notamment pour le suivi de la matière organique et des évolutions de la pédogénèse), en relation avec l'usage du sol qui en est fait.

Les experts ont insisté sur le fait de développer une **recherche multidisciplinaire** (physiciens, chimistes, biologistes du sol, physiciens mais aussi hydrologues, écologues et sociologues). Ils ont évoqué le besoin de prendre en compte différentes échelles du sol dans la recherche : l'objectif est de relier le raisonnement à l'échelle microscopique du sol (caractéristiques…) avec le raisonnement à l'échelle globale (gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant…).

		Augmentation de la température de l'air	Modification du régime des précipitations	Augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses	Modification des gelées et épisodes neigeux	Augmentation des tempêtes, vents violents, cyclones	Augmentation de la concentration en CO2 de l'air	Augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations	Augmentation du niveau de la mer (submersion)	Augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies	Inondations par ruissellement et coulées de boue	Erosion (éolienne, hydrique, du trait de côte)	Mouvements et effondrements de terrain	Retrait-gonflement des argiles	Salinisation des sols	Modification de la biodiversité	Désertification	Acidification des sols	Perte d'éléments nutritifs dans les sols	
Services écosystémiques	Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	3	6	6	6	6	6	103
	Approvisionnement en matériaux	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	3	5	6	6	5	5	100
	Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	5	6	5	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	5	3	3	70
	Support pour les habitations et infrastructures	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	54
	Purification et maintien de la qualité de l'air	5	6	5	4	4	4	5	5	5	5	5	3	3	4	4	5	4	4	80
	Purification et maintien de la qualité de l'eau	6	6	6	5	5	5	6	6	6	6	6	4	3	4	5	6	5	4	94
	Régulation du climat des villes et des bâtiments	5	6	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	5	3	3	69
	Atténuation du changement climatique	5	6	6	5	5	5	6	6	6	5	6	4	3	4	5	6	4	4	91
	Régulation des flux d'eau	6	6	5	4	5	4	5	5	5	5	5	3	3	4	4	6	4	4	83
	Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	5	6	5	4	4	4	5	5	5	4	5	3	3	4	4	5	4	4	79
	Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	6	6	6	4	5	4	5	5	5	5	5	3	3	4	5	6	4	4	85
	Services culturels	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	56
	Aides des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux séch	5	6	5	4	4	4	5	5	5	5	5	3	3	4	4	5	4	4	80
Fonctions écologiques	Filtration et épuration de l'eau	5	6	5	4	4	4	5	5	5	5	5	3	3	4	4	5	4	4	80
	Infiltration et rétention de l'eau	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	3	3	4	5	6	4	4	82
	Support de la végétation & production de biomasse	4	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	5	3	5	6	6	6	5	97
	Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques	5	6	6	5	5	5	6	6	6	6	6	4	3	4	5	6	5	4	93
	Régulation des cycles biogéochimiques	4	5	5	4	5	3	6	6	6	5	6	4	3	4	5	6	4	4	85
	Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphérique	5	6	5	4	4	4	5	5	5	4	4	3	3	4	4	5	4	3	77
Caractéristiques du sol	Texture	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	53
	Structure	4	6	5	4	4	4	5	5	5	4	4	3	3	4	4	5	4	3	76
	Teneur en matière organique	5	5	6	4	5	4	6	6	5	5	5	4	3	4	5	6	4	4	86
	Teneur en nutriments	5	5	6	4	5	4	6	6	5	5	5	4	3	4	5	6	4	4	86
	pH du sol	4	5	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	5	3	3	67
	Humidité/Saturation	5	4	5	4	5	4	6	6	6	5	5	4	3	4	5	6	4	4	85
	Organismes vivants	4	4	5	5	6	4	6	6	6	6	6	4	3	5	6	6	5	5	92
	Teneur en CO2	4	5	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	3	3	66
	Température	4	5	4	3	3	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	4	3	3	64
		131	146	138	114	126	112	140	140	138	132	135	97	84	109	125	147	112	107	

Importance croissante du besoin de connaissances

Figure 14 : Cartographie de l''enjeu d'approfondissement des connaissances de l'impact du changement climatique sur les sols

6. Rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique

6.1. L'état des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique

La production de la matrice ci-dessous de **l'état des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique** (Fig. 16) a permis de mettre en exergue plusieurs observations portant sur le périmètre « sols » et le périmètre « mesures d'adaptation ».

- **Périmètre « Sols »**

La majorité des publications démontre une certaine connaissance des impacts des mesures d'adaptation sur les caractéristiques du sol telles que l'**humidité/saturation**, la **teneur en matière organique** et la **structure**.

- **Périmètre « Mesures d'adaptation »**

Les publications du corpus concernent à **66% les mesures d'adaptation des sols agricoles** (en particulier via le travail du sol et l'irrigation) et à **28% les sols urbains** (végétalisation des espaces urbains ou des bâtiments). Elles étudient l'influence des mesures d'adaptation centrées sur le sol en tant que support de végétation (peu d'études analysent en effet le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique sans sa végétation) et les fonctions et services liés à la gestion de l'eau dans les sols, et plus globalement au cycle de l'eau via l'évapotranspiration.

		Travail du sol	Dispositifs externes d'apport et de maintien de l'humidité des sols	Choix d'espèces et de variétés	Infrastructures agroécologiques	Assolement et rotation	Modes de production	Couverture du sol	Végétalisation des espaces urbains	Végétalisation des bâtiments	Perméabilisation des revêtements urbains	Construction de digues	Equipements/support de production d'énergies renouvelables	
Services écosystémiques	Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	4	9	2	1	3	4	10	0	0	0	0	0	33
	Approvisionnement en matériaux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Support pour les habitations et infrastructures	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Purification et maintien de la qualité de l'air	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	Purification et maintien de la qualité de l'eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Régulation du climat des villes et des bâtiments	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
	Atténuation du changement climatique	2	2	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	8
	Régulation des flux d'eau	1	2	1	1	1	1	1	4	3	3	0	0	18
	Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Services culturels	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
	Aides des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux séch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fonctions écologiques	Filtration et épuration de l'eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Infiltration et rétention de l'eau	3	2	2	1	1	2	4	3	4	3	1	0	26
	Support de la végétation & production de biomasse	8	12	3	2	4	6	12	4	4	3	0	0	58
	Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques	1	1	1	1	1	3	0	0	0	0	0	0	8
	Régulation des cycles biogéochimiques	4	3	0	1	3	4	3	1	0	0	1	0	20
	Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphérique	1	3	0	0	0	0	4	3	4	3	0	0	18
Caractéristiques du sol	Texture	1	2	0	1	2	2	1	1	1	0	0	1	12
	Structure	5	1	0	1	1	2	5	0	0	0	0	0	15
	Teneur en matière organique	7	3	0	1	3	7	5	1	1	0	0	0	28
	Teneur en nutriments	2	3	0	1	2	2	2	0	1	0	0	0	13
	pH du sol	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	Humidité/Saturation	10	6	1	2	2	7	14	0	1	0	1	1	45
	Organismes vivants	1	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	6
	Teneur en CO2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Température	3	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	10
		53	49	10	13	24	47	69	24	19	12	3	3	

Figure 15 : Cartographie de l'état des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique

6.2. Le degré de contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique

Le Figure 17 ci-dessous dresse le bilan du degré de contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique.

- **Périmètre « Sols »**

Les principaux impacts des mesures d'adaptation concernent le sol en tant que **support pour le monde vivant** (végétalisation des espaces urbains, des bâtiments et la plantation de végétaux en dehors des zones urbaines, etc.) et **interface** dans le cadre du cycle de l'eau. La végétation joue sur les ambiances urbaines, à travers la qualité environnementale qu'elle transmet aux habitants qui sont particulièrement sensibles à la réintroduction de la végétation en ville, et contribue à atténuer les phénomènes d'îlots de chaleur urbains. De plus, la présence de sols non imperméabilisés participe à une meilleure gestion des eaux d'orage.

- **Périmètre « Mesures d'adaptation »**

L'une des mesures d'adaptation ayant le plus d'influence sur les sols semble être la mise en place d'**infrastructures agro-écologiques** (arbres, haies, enherbement…), correspondant à des habitats semi-naturels qui ne reçoivent ni fertilisants chimiques, ni pesticides et qui sont gérés de manière extensive. Essentielles pour l'environnement, elles contribuent à la préservation de la biodiversité, au cycle et à la qualité de l'eau ainsi qu'au stockage de carbone. Le **choix d'espèces/essences/variétés** (notamment en sylviculture et viticulture), la **modification de l'assolement et de la rotation** vers une végétation plus diversifiée, l'**irrigation efficiente**, dont irrigation de précision, le **travail réduit du sol et le semis direct sur résidus** et les **modes de production** (bio, utilisation de fertilisants, pesticides…) jouent un rôle dans l'adaptation du sol au changement climatique.

La couverture des sols agricoles par la **plantation de végétaux** permet notamment le stockage du carbone (c'est le cas de l'enherbement aux pieds des vignes), limitent le ruissellement et l'érosion et facilitent le stockage de l'eau et le transfert de polluants.

En zone urbaine, la préservation et la réintroduction de sols perméables permettent de limiter l'imperméabilisation (et donc les effets liés aux inondations). Les toitures stockantes composées de sols absorbants peuvent par ailleurs faciliter la gestion des eaux pluviales urbaines en limitant les débits de pointe.

La **végétalisation des espaces urbains** joue un rôle dans la régulation thermique et le développement de la biodiversité ; c'est le cas des toitures végétalisées, dont les fonctions peuvent être multiples : rétention des eaux pluviales, régulation thermique de l'immeuble, traitement paysager, protection de l'étanchéité, …

		Travail du sol	Dispositifs externes d'apport et de maintien de l'humidité des sols	Choix d'espèces et de variétés	Infrastructures agroécologiques	Assolement et rotation	Modes de production	Couverture du sol	Végétalisation des espaces urbains	Végétalisation des bâtiments	Perméabilisation des revêtements urbains	Construction de digues	Equipements/support de production d'énergies renouvelables	
Services écosystémiques	Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2		1	28
	Approvisionnement en matériaux	3	3	2	3	3	3	3	3	1	2			26
	Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	1	1	1	2	1	1	1	1					9
	Support pour les habitations et infrastructures													0
	Purification et maintien de la qualité de l'air	2	2	1	2	2	2	1	2		1			15
	Purification et maintien de la qualité de l'eau	2	2	2	3	2	2	2	3	1	1			20
	Régulation du climat des villes et des bâtiments	1	1	1	2	1	1	1	1					9
	Atténuation du changement climatique	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1			19
	Régulation des flux d'eau	2	2	2	3	2	2	2	2		1			18
	Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	2	1	1	2	2	1	1	2		1			13
	Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	2	2	2	2	2	2	2	2		1			17
	Services culturels	1			1				1					3
	Aides des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux séch	2	2	2	3	2	2	2	2		1			18
Fonctions écologiques	Filtration et épuration de l'eau	2	2	1	2	2	2	1	2		1			15
	Infiltration et rétention de l'eau	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1			19
	Support de la végétation & production de biomasse	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2			27
	Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques	3	2	2	3	3	2	2	3	1	1			22
	Régulation des cycles biogéochimiques	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1			19
	Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphérique	2	2	1	2	2	2	1	2		1			15
Caractéristiques du sol	Texture													0
	Structure	2	1	1	2	2	1	1	2		1			13
	Teneur en matière organique	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1			19
	Teneur en nutriments	2	2	2	3	2	2	2	2		1			18
	pH du sol	1	1	1	1	1	1	1	1					8
	Humidité/Saturation	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1			19
	Organismes vivants	3	3	2	3	3	3	3	3	1	2			26
	Teneur en CO2	1	1	1	1	1	1	1	1					8
	Température	1	1	1	2	1	1	1	1					9
		51	47	42	63	50	47	44	52	11	24	0	1	

1	2	3

Importance croissante du degré de modification des sols par les mesures d'adaptation (en blanc : nul ou négligeable)

Figure 16 : Cartographie du degré de contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique

6.3. L'enjeu d'approfondissement des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique

- **Périmètre « Sols »**

La cartographie ci-dessous (Fig.18) identifie plusieurs besoins d'approfondissement, notamment sur la **gestion quantitative et qualitative de l'eau** (stockage, infiltration, alimentation en eau de la végétation). Il s'agit ici de se poser la question de la manière dont le sol peut conserver l'eau de manière optimale et comment favoriser l'alimentation en eau des cultures.

Une autre question se pose sur la gestion de la **matière organique** qui peut modifier les propriétés des sols et la gestion de l'eau. La matière organique et le carbone représentent tous les deux des paramètres sur lesquels il est possible d'agir dans le cas de l'atténuation et de l'adaptation. La teneur en matière organique peut en effet modifier les propriétés des sols et améliorer la capacité de rétention d'eau des sols. Elle peut également modifier les vitesses d'évaporation, affecter les vitesses d'infiltration, ainsi que la biodiversité. Le cas du milieu urbain est important, dans les faits, le retour de la matière organique (i.e. celle contenue dans la « terre végétale » souvent décapée sur les chantiers de construction, puis transférée/déplacée) sur les sols devra être étudié, à travers le recyclage des déchets organiques et la création d'une filière dédiée.

La cartographie révèle enfin le besoin d'approfondissement sur la **biodiversité**, notamment à travers des recherches qui pourront par exemple porter sur l'évaluation du rôle de la végétation et des sols urbains dans le bilan carbone des villes.

Par ailleurs, les entretiens avec les experts ont montré l'intérêt pour l'étude de la résilience des sols et de la manière d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols dégradés.

- **Périmètre « Mesures d'adaptation »**

L'analyse de la cartographie révèle un certain besoin d'approfondissement concernant les **mesures de végétalisation**, à la fois des espaces urbains et ruraux, pour lutter contre l'artificialisation des sols. L'objectif est d'identifier quelles mesures sont les plus adaptées pour répondre à un besoin donné tel que la conservation de l'eau des sols : pratiques agricoles (travail réduit du sol, couvertures végétales permanentes…), aménagements (cordons pierreux), aménagement de noues, etc.

En conclusion, il est nécessaire de décrire les résultats des mesures d'adaptation non seulement en termes **environnementaux** (érosion, qualité de l'eau…), mais aussi **économiques** en comparaison avec des pratiques conventionnelles, voire **sociaux** afin de motiver les acteurs territoriaux. Par exemple, les nouvelles recherches portant sur le sol et le changement climatique pourront préciser les services écosystémiques fournis par des systèmes complexes tels que l'agroforesterie.

Il est essentiel d'envisager des **mesures d'adaptation à l'échelle territoriale/paysagère** et d'étudier les modifications que cela engendre (techniques, formation, services, institutionnelles…).

		Travail du sol	Dispositifs externes d'apport et de maintien de l'humidité des sols	Choix d'espèces et de variétés	Infrastructures agroécologiques	Assolement et rotation	Modes de production	Couverture du sol	Végétalisation des espaces urbains	Végétalisation des bâtiments	Perméabilisation des revêtements urbains	Construction de digues	Equipements/support de production d'énergies renouvelables	
Services écosystémiques	Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	6	5	6	6	6	6	4	6	4	5	3	4	61
	Approvisionnement en matériaux	6	6	5	6	6	6	6	6	4	5	3	3	62
	Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	4	4	4	5	4	4	4	4	3	3	3	3	45
	Support pour les habitations et infrastructures	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	36
	Purification et maintien de la qualité de l'air	5	5	4	5	5	5	4	5	3	4	3	3	51
	Purification et maintien de la qualité de l'eau	5	5	5	6	5	5	5	6	4	4	3	3	56
	Régulation du climat des villes et des bâtiments	4	4	4	5	4	4	4	4	3	3	3	3	45
	Atténuation du changement climatique	5	5	5	6	5	5	5	5	4	4	3	3	55
	Régulation des flux d'eau	5	5	5	6	5	5	5	5	3	4	3	3	54
	Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	5	4	4	5	5	4	4	5	3	4	3	3	49
	Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	5	5	5	5	5	5	5	5	3	4	3	3	53
	Services culturels	4	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3	39
	Aides des secteurs économiques agricoles et forestiers à s'adapter aux séch	5	5	5	6	5	5	5	5	3	4	3	3	54
Fonctions écologiques	Filtration et épuration de l'eau	5	5	4	5	5	5	4	5	3	4	3	3	51
	Infiltration et rétention de l'eau	5	5	5	6	5	5	5	5	4	4	3	3	55
	Support de la végétation & production de biomasse	5	4	6	6	6	5	4	6	4	5	3	3	57
	Habitat et réservoir de biodiversité et interactions biotiques	6	5	5	6	6	5	5	6	4	4	3	3	58
	Régulation des cycles biogéochimiques	5	5	5	6	5	5	5	5	4	4	3	3	55
	Régulation de la température, des précipitations, processus atmosphérique	5	5	4	5	5	5	4	5	3	4	3	3	51
Caractéristiques du sol	Texture	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	36
	Structure	4	4	4	5	5	4	3	5	3	4	3	3	47
	Teneur en matière organique	4	5	5	6	5	4	4	5	4	4	3	3	52
	Teneur en nutriments	5	5	5	6	5	5	5	5	3	4	3	3	54
	pH du sol	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	44
	Humidité/Saturation	3	4	5	6	5	4	3	5	4	4	3	3	49
	Organismes vivants	6	6	5	6	6	6	6	6	4	5	3	3	62
	Teneur en CO2	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	44
	Température	4	4	4	5	4	4	3	4	3	3	3	3	44
		130	127	126	147	134	128	119	136	95	108	84	85	

Importance croissante du besoin de connaissances

Figure 17 : Cartographie de l'enjeu d'approfondissement des connaissances de la contribution des sols aux processus d'adaptation au changement climatique

7. Pistes de recherche pour l'approfondissement des connaissances

Ce chapitre consolide les retours d'entretiens avec les différents experts (dont la liste est présentée en annexe de ce document) et l'ensemble des propositions formulées pendant le Comité d'Orientation Technique n°2. Il est organisé autour des quatre questions de recherche suivantes :

- Quels sont les impacts du changement climatique sur les sols ?
- Quelles sont les mesures permettant d'adapter les sols au changement climatique ?
- Comment les sols peuvent-ils contribuer à l'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ?
- Quels sont les impacts sur la qualité des sols des mesures d'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ?

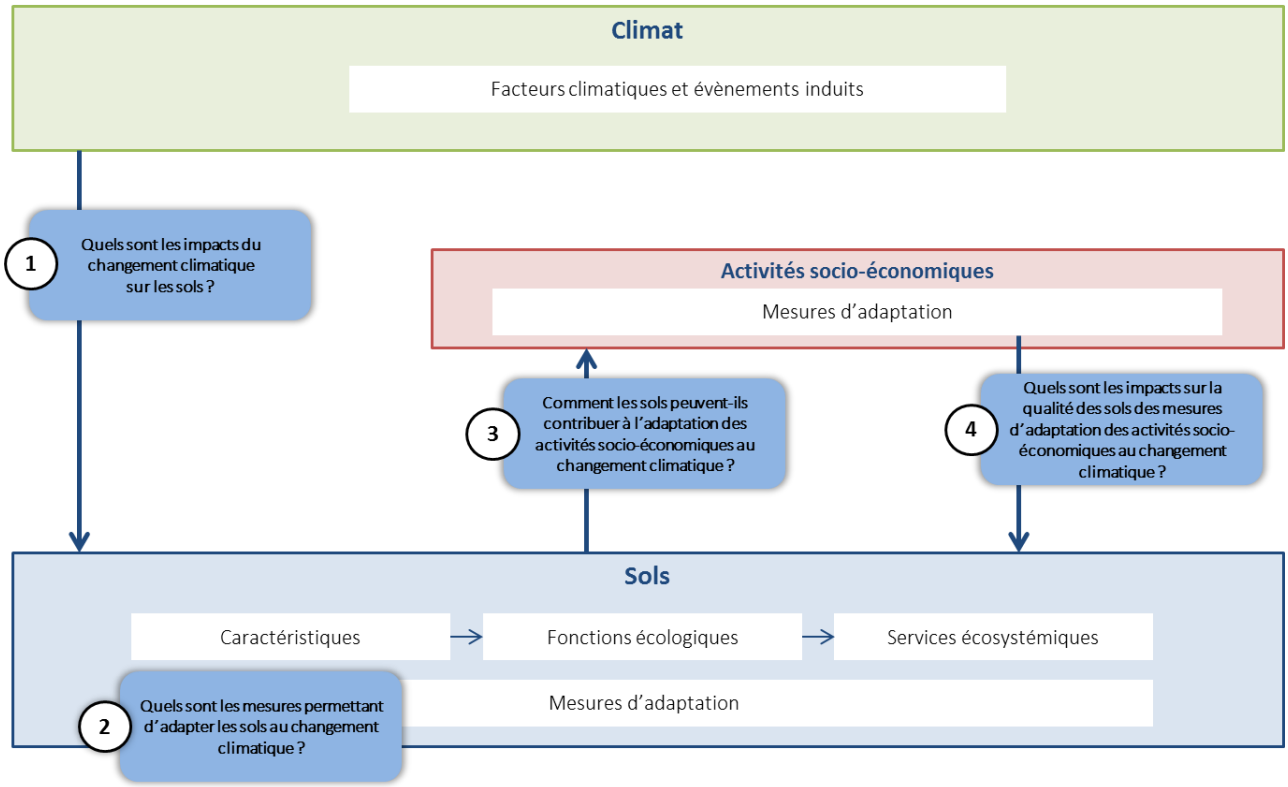


Figure 18 : Présentation des 4 principales questions de recherche à approfondir

Pour chaque question de recherche, le groupement a associé des pistes de recherche réparties par type de sols (sols forestiers, sols agricoles, sols urbains, autres sols spécifiques et tout type de sol) et par thématique clé (ex : carbone/nutriments, eau,…). Les pistes indiquées en gras ont été proposées lors du comité d'orientation technique le 6 avril (les commentaires émis lors de cette réunion sont indiqués en sous-points en italique).

Les pistes de recherche et les recommandations associées ont été classées par grandes catégories :

- Création des connaissances (C)
- Approfondissement/renforcement des connaissances (A)
- Transfert des connaissances (T)

Les missions de l'ADEME portent surtout sur les catégories « A » et « T ». Par exemple, concernant les missions sur les sols pollués, l'ADEME intervient pour assurer des travaux de mise en sécurité et de réhabilitation des sites et sols pollués. Elle participe également à l'amélioration des connaissances sur les polluants et les techniques de traitement tout en développant des méthodes de gestion de ces sites et d'évaluation des enjeux environnementaux et sanitaires.

De manière générale, il semble important de définir une vision de ce doivent être des sols sains, équilibrés, durables et adaptés. Cette vision devant se traduire par des objectifs clairs, notamment en ce qui concerne l'artificialisation des sols et l'attribution d'un certain nombre d'intérêts tels que le maintien de la vie, de la diversité, le besoin de résilience, de sobriété… Cette vision, à construire au niveau national, pourrait se traduire à l'ADEME par la réaffirmation de l'importance des sols en amont de toutes les actions qu'elle mène (par exemple dans les appels à projets de recherche). La réaffirmation de l'importance des sols peut s'appuyer en partie sur l'évaluation de leur valeur, même s'il s'agit d'éviter des raisonnements trop simplificateurs (le sol ne doit pas être résumé à une fonction ou un service).

Recommandations transverses pour la mise en place des pistes de recherches

- Développer la multidisciplinarité
- Associer les approches (expérimentations, modélisations, observation et manipulation d'écosystèmes)
- Associer les observations à court terme et long terme
- Organiser la collecte, le traitement et la valorisation des données de suivi (observatoire sols et changement climatique) pour tout type de sol (vision holistique) et de pratiques
- Comparer ce qui est prévu par les modèles avec ce qu'il se passe réellement
- Sensibiliser les différents acteurs et assurer un portage des connaissances du milieu scientifique au grand public

Recommandations spécifiques aux questions liées à l'adaptation (questions 2, 3 et 4)

- Prendre en compte les dimensions socio-économique et institutionnelle des mesures d'adaptation
- Identifier les besoins de compétences des acteurs du territoire pour favoriser l'adaptation
- Bien définir les modalités de l'acceptation des mesures d'adaptation (information, éducation…)

7.1. Quels sont les impacts du changement climatique sur les sols ?

Cette question vise à approfondir les connaissances des impacts du changement climatique sur les sols : leurs propriétés, leurs fonctions écologiques et les services écosystémiques qu'ils rendent.

Carbone / nutriments	
Sols forestiers	1) **Réaliser une analyse bibliographique des acquis de connaissances sur les impacts des feux de forêt sur la matière organique des sols forestiers, dans un contexte de changement climatique (T)** ○ *Des études existent déjà dans les pays méditerranéens. Il faudrait peut-être en réaliser dans d'autres zones.*
Sols urbains	2) Connaître les flux de carbone des milieux urbains dans des conditions pédoclimatiques différentes afin d'être en mesure d'évaluer l'impact du changement climatique sur ces flux (C)
Tout type de sol	3) **Affiner la modélisation des différents processus (liens entre propriétés, fonctions et services des sols et chaîne des impacts du changement climatique) afin d'enrichir les modèles existants (A)** ○ *Des équipes travaillent déjà sur l'influence de la concentration en CO_2 sur la formation des sols, ainsi que sur l'acidification (à substrat égal, le pH augmenterait quand le climat devient plus chaud). Il existe des travaux sur les liens biogéochimiques dans un contexte de changement climatique (réseau FACCE).* ○ *Exemple : étude du devenir du carbone associé aux processus de transferts érosifs et de délocalisation des sédiments dans un contexte de changement climatique* 4) Approfondir la connaissance de l'évolution des cycles de l'azote et du phosphore par rapport aux évolutions climatiques (température, précipitations, alternance chaud/froid, sec/humide) en prenant en compte des valeurs moyennes et extrêmes (A) 5) Approfondir la connaissance des transferts de nutriments entre le sol et le milieu aquatique d'un bassin versant dans un contexte de changement climatique (A) 6) Approfondir la recherche sur la télédétection pour la mesure des changements de caractéristiques du sol (humidité, matière organique, etc.) dans un contexte de changement climatique (A)
Eau	
Autres sols spécifiques	7) **Améliorer les connaissances sur l'évolution des sols à hydromorphie temporaire dans un contexte de changement climatique (A)** ○ *Il existe une catégorie de sols mal connue : les sols à hydromorphie temporaire. A la différence des sols humides permanents qui ne représentent qu'une petite surface, les sols à hydromorphie temporaire sont plus importants. Ils représentent une contrainte importante au regard des végétaux qu'ils supportent. En effet, en hiver, les sols sont engorgés, empêchant la respiration des racines et, en été, l'eau s'évacue. Il s'agit alors de comprendre comment se comporteront ces sols au regard du changement climatique : les précipitations, prévues pour être plus importantes en hiver, constitueront-elles une plus forte contrainte ? A l'inverse, y aura-t-il des sécheresses plus importantes l'été ? Cette hydromorphie temporaire constitue alors un véritable filtre pour le choix des essences à implanter.*
	8) Connaître l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau des sols et leur portance (fonction de support) (A)

Tout type de sol	○ *Exemples : variation des régimes hydriques, partage évaporation /infiltration/ruissellement de l'eau, variation de l'humidité des sols et de la réserve utiles, dans des conditions climatiques moyennes et extrêmes* ○ *Sous des climats changeants, pour lesquels il y aurait plus d'humidité en hiver, les sols seraient moins portants et plus sensibles à un tassement engendré par une mécanisation.* 9) Approfondir la connaissance de l'impact du changement climatique sur la dynamique de la matière organique et **ses conséquences sur le cycle de l'eau dans les sols** (selon l'usage des sols) (A) ○ *Il s'agit de produire des connaissances et des données sur les conséquences du changement climatique sur la dynamique de l'eau et sur la matière organique. Par exemple, quel est le bilan hydrique d'un sol si les matières organiques se concentrent dans les premiers centimètres de ce sol ? Dans l'impact du changement climatique sur la dynamique des matières organiques, l'essentiel de l'effort de la recherche a porté sur la température. Il est nécessaire désormais de mettre l'accent sur le régime hydrique et les interactions eau-température-pratiques*
Végétaux	
Sols forestiers	10) Approfondir la modélisation de la répartition des végétaux en réintégrant l'évolution des caractéristiques du sol dans un contexte de changement climatique dans les outils de modélisation (A) ○ *Actuellement, les recherches portant sur l'évolution de la végétation forestière au regard du changement climatique se font en considérant le sol comme un paramètre constant. L'enjeu ici est de réintégrer le sol en tant que paramètre variant et donc influençant la répartition des végétaux*
Sols agricoles	11) Comprendre les évolutions de rendements liés au changement climatique et à ses impacts sur le sol (notamment en lien avec l'augmentation de la concentration en CO_2 dans l'air) (C)
Tout type de sol	12) **Approfondir les connaissances portant sur les stratégies d'adaptation des végétaux pour avoir accès à de l'eau de plus en plus fixée dans les sols (A)** ○ *Exemple : approfondissement de la connaissance de l'adaptation des végétaux pour leur alimentation en eau (ascenseur hydraulique, captation de l'eau liée plus riche en nutriments) en vue d'une meilleure gestion de l'eau* 13) Définir dans quelle mesure le changement climatique modifie les échanges végétaux-sol (modification entrée de C, des prélèvements d'eau…) au regard d'une analyse géographique (gradients climatiques) (C)
Biodiversité	
Tout type de sol	14) **Etudier les impacts du changement climatique sur la biodiversité du sol (interaction température, régime hydrique et réaction des microorganismes) (C)** ○ *La biodiversité des sols est déjà traitée par les recherches actuelles. En revanche, les interactions entre la biodiversité et la modification des températures et des régimes hydriques ne semblent pas assez étudiées au regard du changement climatique.* ○ *Exemple : approfondissement de la connaissance des maladies des végétaux en lien avec le changement climatique, pour les pathogènes qui transitent par le sol* ○ *Exemple : développement de la connaissance de l'expansion des espèces invasives dans les sols au regard du changement climatique (il existe actuellement une méconnaissance des espèces invasives dans les sols)* ○ *Exemple : étude de la biologie fonctionnelle des sols et l'évolution des fonctions*

	d'origine vivante (bactéries…) au regard du changement climatique (relations entre la structure des communautés et fonctions remplies par ces communautés) ○ *Exemple : approfondissement de la connaissance de la résistance des végétaux aux maladies dans des agroécosystèmes complexes*
Autres thématiques	
Sols agricoles	15) Etudier les modifications de la structure du sol au regard de l'évolution des précipitations et les impacts de ces changements sur les pratiques agricoles (C) ○ *Exemple : étude du phénomène de développement des croûtes de battance*
Sols urbains	16) Redéployer l'acquisition de données pédoclimatiques pour une meilleure modélisation des phénomènes de retrait-gonflement d'argiles (RGA) dans un contexte de changement climatique (A) ○ *Sujet critique dans le secteur de la construction*
Tout type de sol	17) Adapter les modèles actuels de mobilité des polluants dans le sol dans un contexte de changement climatique (A) ○ *Exemple : il s'agit surtout de vérifier si les modèles actuels de mobilité des polluants peuvent permettre de décrire ce qu'il se passe en cas d'augmentation des fréquences des précipitations ou d'autres variables du changement climatique* 18) **Etudier les différents impacts du changement climatique induisant une acidification du sol (ex: teneur partielle CO2, teneur en eau, etc.) (C)** 19) Approfondir la connaissance des caractéristiques des sols forestiers et urbains grâce à leur cartographie pour évaluer les impacts du changement climatique et l'anticiper (A) 20) **Développer des méthodes d'analyse de la vulnérabilité des sols (C)** ○ *Avant de pouvoir définir quelle importance donner à un service ou une fonction, il est nécessaire de s'assurer que toutes les fonctions et que tous les services sont connus et reconnus, et si ce n'est pas le cas de déterminer ce qu'il reste à faire pour les reconnaître. A l'heure actuelle, il existe déjà des connaissances et des données mais certains points mériteraient certainement d'être approfondis. Bien que les données à disposition ne permettent que de réaliser des analyses simples, il s'agit d'un premier pas visant à orienter la prise de décision pour la prise en compte des sols. Il faudra bien entendu refaire le point sur les connaissances dans quelques années, redonner des objectifs pour les politiques publiques et continuer la recherche pour viser des connaissances plus exhaustives.* 21) **Réaliser une cartographie des sols vulnérables (redlist des sols) et des indicateurs de vulnérabilité des sols au changement climatique à partir de données déjà disponibles (A)** ○ *Il pourrait être intéressant de parvenir à produire une carte des sols inadaptables ou des sols vulnérables (à l'image de la liste rouge des espèces ou des écosystèmes). Une telle cartographie pourrait constituer une base pour ensuite projeter les évolutions climatiques. Or, cela suppose d'avoir des données pour produire de telles cartographies. Il faut donc être en mesure de définir précisément les données dont on dispose déjà ou à acquérir (quelles mesures, pour quels services…).* 22) **Développer la connaissance des impacts passés du changement climatique sur les sols (à des pas de temps différents) (C)** ○ *Il semblerait que la connaissance des impacts du changement climatique passé sur les sols soit incomplète. En effet, il y aurait eu plus de recherche sur les questions de l'élévation de la température que sur l'évolution des précipitations,*

Tout type de sol	*et cela sur certaines fonctions du sol (toutes les fonctions du sol ne sont pas assez connues au regard de leur évolution vis-à-vis du changement climatique).* 23) Approfondir l'étude des phénomènes d'érosion hydrique et éolienne au regard de l'augmentation des sécheresses et de la présence de sols nus (A) 24) Approfondir l'étude des conséquences de l'augmentation du niveau de la mer sur le sol en général et son impact sur les sols des zones humides / semi-humides en particulier (A) 25) **Approfondir l'étude de l'évolution de la pédogénèse au regard de l'évolution climatique** (A) o *Il existe actuellement des approches qui visent à réintégrer les acquis sur les processus sédimentaires dans les outils de modélisation des autres composantes de l'environnement. Des thèses sont actuellement menées afin de déterminer comment le réchauffement climatique va faire évoluer la formation des sols et donc leurs propriétés. Une étude pourra être menée sur la rapidité de l'érosion des sols au regard de la pédogenèse (vers un épaississement ou amincissement des sols ?).* 26) Approfondir l'étude de sites d'observation Long Terme (LT) en augmentant la fréquence du suivi et les paramètres suivis (climat, sol, usages), notamment par le développement de technologies à moindre coût, en ayant à disposition des données historiques (écothèques) et en se basant sur les réseaux existants (A) o *Exemple : développer le suivi de l'évolution des sols afin de mieux prédire les évolutions liées aux modifications du changement climatique : suivi de la structure du sol, suivi de la végétation, suivi des usages qui amplifient le changement climatique (C)* o *Exemple : développer l'observation des sols gelés (permafrost), des sols riches en matières organiques (tourbières), sols urbains et péri-urbains (en lien avec la sécheresse), des sols montagneux (en pente) et des sols hétérogènes (C)*

7.2. Quelles sont les mesures permettant d'adapter les sols au changement climatique ?

Il s'agit ici d'identifier les mesures qui modifient les propriétés des sols (texture, structure, teneur en matière organique, etc.) et donc les *fonctions écologiques* qu'ils fournissent (régulation de la température, support de la végétation, etc.) leur permettant de s'adapter au changement climatique. Entre autre, le taux d'humidité des sols est déterminant des fonctions écologiques.

Matière organique	
Tout type de sol	27) Evaluer dans quelle mesure l'augmentation de la teneur organique des sols leur permet de mieux s'adapter au changement climatique (régime hydrique, régime thermique, pluies érosives…) (A) ○ *Il s'agit ici de développer des lois ou des modèles prédictifs qui tiennent compte de la diversité des sols*
Autres thématiques	
Sols forestiers	28) **Etudier les conséquences de l'enfrichement sur l'adaptation des sols (C)** ○ *L'enfrichement se traduisant par le gain de surfaces forestières, cela pourrait participer à l'adaptation au changement climatique dans le sens où le sol n'est plus utilisé pour une activité socio-économique et demeure protégé contre l'érosion éolienne et hydrique. Il faudrait développer des connaissances sur ce point puisque ce changement d'usage des sols, contrairement à d'autres, pourrait avoir des conséquences positives sur l'adaptation des sols au changement climatique.*
Tout type de sol	29) **Etudier les impacts des zones de transition sur le recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique (C)** ○ *Il s'agit ici d'étudier l'impact de la préservation de certains milieux ayant des fonctions écologiques particulières (et notamment des sols de ces milieux) sur le recul du trait de côte* 30) Intégrer la dimension du changement climatique dans les modalités de réhabilitation/refonctionnalisation des sols (A) ○ *Il s'agit d'anticiper l'évolution des facteurs climatiques et des événements induits lors d'opérations sur les sols*

7.3. Comment les sols peuvent-ils contribuer à l'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ?

Cette question traite surtout de l'articulation entre les fonctions des sols et les services écosystémiques qu'ils peuvent fournir ; l'adaptation au changement climatique d'une activité socio-économique constitue alors un service rendu par les sols.

Les secteurs concernés par la contribution des sols à l'adaptation sont notamment l'agriculture, la sylviculture, l'urbanisme (en lien avec la gestion des eaux pluviales et le rafraichissement urbain), la santé (en lien avec le développement de pathogènes), l'eau, la biodiversité, les risques naturels et la gestion du littoral.

Services écosystémiques rendus par les sols	
Gestion de l'eau	31) Approfondir la connaissance du rôle des sols non imperméabilisés dans la dynamique des flux d'eau et la prévention du risque (C) o *Le sol permet la régulation de 3 types d'inondation : l'inondation de plaine avec la montée de la nappe phréatique, l'inondation torrentielle rapide et l'inondation urbaine par ruissellement ultrarapide* 32) Etudier la contribution des sols dans la rétention de l'eau au niveau d'un bassin versant, afin de fournir une ressource suffisante aux différentes activités socio-économiques en cas de sécheresse ou au cours d'une période d'étiage (C)
Support de végétation	33) Approfondir la connaissance et développer des outils permettant de quantifier les services écosystémiques rendus par le couple sol-végétation pour s'adapter au changement climatique : rafraichissement de la température de l'air, isolation des bâtiments, gestion des eaux pluviales par les toitures végétalisées… (C) 34) Etudier dans quelle mesure le sol peut contraindre l'utilisation de nouvelles espèces plus résistantes au changement climatique (C) o *Bien que le choix d'essences forestières ou de variétés agricoles soit une question qui se pose depuis longtemps, celle-ci ne s'est quasiment jamais posée au regard du changement climatique. Le sol constitue donc un facteur pour le choix des espèces/essences à cultiver : il offrira un plus ou moins grand panel de possibilités. Le rôle du sol en tant que facteur commence déjà à être pris en compte, notamment par le Parc Naturel du Haut-Jura qui a réalisé une cartographie des sols pour étudier dans quelle mesure le choix des essences allait être influencé. Ce rôle de facteur se traduit au niveau trophique avec la présence de nutriments (les sols représentent un gradient de nutrition pour les végétaux) et de l'approvisionnement en eau, qu'il s'agisse de la réserve utile des sols ou de leur caractère hydromorphique temporaire.* o *Le choix de végétaux adaptés aux types de sols et à la ressource en eau disponible se pose également en milieu urbain, notamment dans un contexte de changement climatique : la végétation pourra aider à s'adapter au changement climatique à travers la lutte contre les îlots de chaleur, mais les végétaux ne pousseront plus en-dessous d'un certain seuil d'humidité.* 35) Etudier le rôle des sols en tant qu'habitat pour la biodiversité et leur contribution à la vitalité des corridors et aux niches écologiques territoriales et urbaines (C) et (A) o *Remarque de l'ANR : Les trames vertes, qui constituent souvent des infrastructures agro-écologiques, mobilisent de façon importante les communautés de chercheurs, notamment en termes d'acquisition de données relatives à divers champs disciplinaires. Elles constituent donc une opportunité pour proposer des questions de recherche, dans les champs de TRL de l'ADEME, car les questions liées aux trames vertes sont plutôt fédératrices sur les territoires et se situent à l'intersection de diverses thématiques : biodiversité, inondations, choix d'usage, rafraîchissement… Le sujet des trames vertes semble plus porteur de*

	recherches futures que celui du littoral. En effet, ce dernier est soumis à des conflits d'usage et disposent de moins de données métrologiques et d'équipes étudiant ce milieu, bien que l'intérêt du montage de projets interdisciplinaires soit incontesté.

7.4. Quels sont les impacts sur la qualité des sols des mesures d'adaptation des activités socio-économiques au changement climatique ?

Cette question vise à connaître dans quelle mesure les actions qui sont mises en place dans un objectif d'adaptation au changement climatique des activités socio-économiques ont des impacts (positifs ou négatifs) sur les sols eux-mêmes.

Gestion agricole et forestière : changement d'usages des sols et de pratiques	
Pratiques culturales et forestières et choix de nouvelles variétés	1) **Evaluer les effets des changements éventuels d'usage des sols et de pratiques générés ou susceptibles d'être générés par le changement climatique (agro-écologie, irrigation, choix de nouvelles espèces et variétés, couverture de sol, …) (C)** ○ *Exemple 1 : approfondir la connaissance des impacts des agroécosystèmes complexes (infrastructures écologiques: agroforesterie, haies, bandes enherbées) sur le cycle de l'eau des sols, la teneur en nutriments des sols et le microclimat (A). En effet, l'eau constitue la principale limite à la faisabilité technique de l'agroforesterie. Quel est l'impact des infrastructures agro-écologiques, et notamment de l'agroforesterie, sur le microclimat et la dynamique de l'eau dans le sol ? Quel est l'impact de l'agroforesterie sur la concurrence pour l'accès à l'eau entre les arbres, les cultures et les végétaux ?* ○ *Exemple 2 : Evaluer les impacts de l'irrigation (dont irrigation avec des eaux usées traitées) sur la qualité des sols français dans un contexte de changement climatique (A). Très répandue dans les pays où la ressource en eau fait le plus défaut, la réutilisation des eaux usées reste limitée en France (une quarantaine de projets développés à titre expérimental pour l'irrigation des cultures, l'arrosage des golfs et les forêts et prairies). Elle pourrait s'avérer intéressante dans des zones de tension, comme le Nord Pas-de-Calais, la Manche, l'Atlantique et le pourtour méditerranéen, ou dans les îles, où le manque d'eau à usage domestique et agricole est souvent chronique. La réutilisation des eaux usées traitées est aussi vue comme une solution pour éviter de trop puiser dans l'eau des rivières ou des nappes phréatiques, à la période d'étiage notamment.* ○ *Exemple 3 : Anticiper les effets prévisibles sur les sols du choix de nouvelles variétés agricoles et forestières (dont essences exotiques) pour l'adaptation au changement climatique (C). Le choix de nouvelles cultures pourrait éventuellement engendrer des manques d'eau, qui modifieraient l'implantation des couverts intermédiaires. L'introduction d'essences exotiques est réalisée dans une volonté d'augmenter la productivité forestière, mais ses impacts sur les qualités des sols ne sont pas connus (impacts sur les litières, la biodiversité…).Le choix de nouvelles essences et de pratiques sylvicoles pourrait engendrer une modification de la dynamique d'accumulation de la matière organique liée au vieillissement des peuplements.* ○ *Exemple 4 : Etudier les impacts des techniques de couverture du sol (paillage ou mulching, semi sous couvert, etc.) sur la conservation de l'humidité des sols au regard du changement climatique (A)* ○

Gestion urbaine	
Végétalisation des espaces urbains	2) **Evaluer les effets prévisibles sur les sols urbains du choix de nouvelles variétés végétales et des effets d'une végétalisation plus intense des espaces non imperméabilisés sur le cycle de l'eau (A)**
Autres activités socio-économiques	
Modification du paysage	3) Approfondir la connaissance des impacts de la complexification des paysages sur les ruissellements et l'érosion dans un contexte de changement climatique (A) ○ *Exemple 1 : conservation et gestion de l'eau par des infrastructures paysagères urbaines telles que les noues ou les bassins de rétention des eaux pluviales* ○ *Exemple 2 : conservation de l'eau par les mesures d'adaptation en milieu rural (ex : agroforesterie)*

8. Conclusion

Les changements climatiques en cours au niveau mondial, notamment les hausses de température, influencent déjà de nombreux systèmes physiques et biologiques. Mais aujourd'hui, l'impact du changement climatique sur le sol, les ressources en eau et les écosystèmes naturels et agricoles reste mal connu, d'autant plus que l'Homme accélère en parallèle la **dégradation des sols** à travers la production agricole et l'élevage (surproduction, surpâturage, reconversion forestière), l'urbanisation, la déforestation, etc.

Le sol occupe une **position d'interface dans l'écosystème** : interface entre les roches, l'atmosphère, l'eau et les êtres vivants dont il est le support. Au cœur de la dynamique du carbone, il a un rôle à la fois de **puits** et de **source**. Mais le sol exerce d'autres fonctions comme le stockage et le transit de l'eau (aquifères), l'alimentation des hydro-systèmes de surface ou l'alimentation des cultures et des êtres vivants. Le sol est, de plus, un monde vivant actif et son fonctionnement biologique est étroitement dépendant, lui aussi, de paramètres climatiques comme la température ou la pluviométrie. Les **relations sol-climat** apparaissent donc essentielles pour différents phénomènes : d'une part, la dynamique du carbone et le fonctionnement biologique qui lui est très lié, d'autre part la dynamique de l'eau qui peut entraîner l'érosion et la salinisation.

L'étude de la littérature scientifique et les entretiens avec les experts ont révélé l'importance donnée aujourd'hui à l'atténuation plutôt qu'à l'adaptation. Dans la plupart des programmes de recherche actuels, la dimension adaptation se retrouve au second plan. C'est le cas du projet 4 pour 1000, qui explique qu'il suffirait d'augmenter de 0,4%, la capacité de stockage en carbone des sols pour absorber la totalité du gaz carbonique émis chaque année sur terre par l'homme.

38 pistes de recherche ont été identifiées, pouvant enrichir les réflexions menées dans le cadre de programmes de recherche actuels. Cette étude a mis en exergue un **déséquilibre significatif** entre les connaissances des impacts du changement climatique sur les sols (26 pistes) et les autres thématiques (rôle des sols dans l'adaptation, adaptation des sols et impacts des mesures d'adaptation) (12 pistes).

En **agriculture et en sylviculture**, la recherche devra avant tout considérer le sol comme un **paramètre variant** à part entière et non comme un ensemble composé de la couche superficielle et du couvert végétal. Sa teneur en matière organique, sa texture, sa température…sont autant de paramètres qui influencent la production de biomasse sur-jacente et impactent les activités socio-économiques.

En **milieu urbain**, le sol aura un rôle clé à jouer pour lutter contre les épisodes pluvieux de plus en plus importants. Pourtant, les connaissances de ces sols restent encore limitées du fait que les sols urbains ont souvent été considérés comme exempt de formes de vie. Les futurs **programmes de recherche appliquée** devront replacer le sol au cœur de la stratégie d'aménagement et permettre de poser les bases d'une connaissance technique partagée. Les savoirs concernant la pédologie urbaine s'avèrent toujours parcellaires et insuffisants pour répondre aux enjeux de l'aménagement urbain de demain. Il conviendrait d'approfondir une question majeure: la caractérisation des sols urbains et leur rôle pour lutter contre le changement climatique.

L'étude a révélé enfin un « vivier » d'acteurs (20 structures nationales de recherche travaillent sur la question des sols) qui pourra sans doute être mobilisé pour répondre aux besoins de connaissance identifiés en termes d'impact et de rôle dans l'adaptation des sols agricoles, forestiers et urbains.

Annexes

Annexe 1 : Présentation des différents périmètres de l'étude

1.1. Périmètre Changement climatique

Le périmètre changement climatique englobe à la fois les facteurs climatiques et les évènements climatiques qu'ils induisent, et les évènements impactant les sols dont ils sont à l'origine.

- **Facteurs climatiques et événements induits**

Augmentation de la température de l'air	Il s'agit de l'augmentation des températures moyennes et extrêmes.
Modification du régime des précipitations	Il s'agit de la modification du régime global des précipitations : augmentation des précipitations hivernales, raréfaction des pluies dans le sud, augmentation des pluies violentes…
Augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses	Les sécheresses combinent les facteurs de températures et de précipitations. Il est prévu que leur fréquence et leur gravité augmentent au cours du siècle à venir.
Modification des gelées et épisodes neigeux	Au regard des modifications des températures et précipitations, les gelées et épisodes neigeux pourraient s'en retrouver modifiés.
Augmentation des tempêtes, vents violents et cyclones	Les épisodes de vents violents, tempêtes et cyclones pourraient être modifiés par le changement climatique.
Augmentation de la concentration en CO_2 de l'air	Le dioxyde de carbone verra sa concentration augmenter au cours du siècle.
Augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations	Les inondations, liées notamment aux crues, verront leur fréquence et leur gravité augmenter au regard notamment de la modification du régime des précipitations.
Augmentation du niveau de la mer (submersion)	Le niveau de la mer sera amené à augmenter au cours du siècle provoquant des cas de submersion marine des terres côtières.
Augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies	Les incendies pourront voir leur fréquence et leur gravité augmenté au cours du siècle, notamment au regard de l'augmentation de la température de l'air et de la fréquence des sécheresses.

- **Evénements impactant les sols**

Erosion (éolienne, hydrique, du trait de côte)	L'érosion consiste en la dégradation ou transformation des sols, sous l'action d'un agent externe tel que le vent ou l'eau.
Inondations par ruissellement et coulées de boue	Il s'agit de phénomènes d'écoulement des eaux, transportant des particules de sols, notamment lorsque ces derniers sont saturés en eau et que l'eau ne peut s'infiltrer.
Mouvements et effondrements de terrain	Il s'agit de déplacements, plus ou moins brutaux du sol, voire du sous-sol, dont l'origine peut être naturelle ou anthropique.
Retrait-gonflement des argiles	Les sols argileux ont la propriété de modifier leur consistance et leur volume selon leur teneur en eau. Ainsi, en contexte humide, la teneur en eau augmente et le volume de sol augmente, alors qu'en condition de sécheresse, le déficit en eau provoquera un phénomène de rétractation.

Salinisation des sols	Cela consiste en l'accumulation du sel dans les sols, occasionnant une dégradation de ces sols, qui deviennent toxiques pour les végétaux qu'ils supportent. Elle peut être due à la submersion marine, mais aussi à des pratiques telles que l'irrigation qui, en l'absence de drainage suffisant et sous l'effet de l'évaporation, favorisera l'accumulation de sels minéraux cristallisés.
Modification de la biodiversité	Les changements climatiques pourront provoquer une modification de la répartition des êtres-vivants présents dans les sols, qu'il s'agisse des micro-organismes, des végétaux, des animaux ou des organismes fongiques.
Acidification des sols	Sous l'effet du changement climatique, et notamment des modifications du régime des précipitations, le pH des sols pourra être modifié.
Perte d'éléments nutritifs dans les sols	La fertilisation des sols pourra être modifiée par le changement climatique, notamment par la perte d'éléments nutritifs, par exemple sous l'effet de précipitations intenses.
Désertification	La désertification consiste en un stade de dégradation très avancé des sols, qui a notamment lieu dans les zones arides.

Le schéma ci-dessous illustre de manière schématique comment les sols sont impactés par les facteurs climatiques :

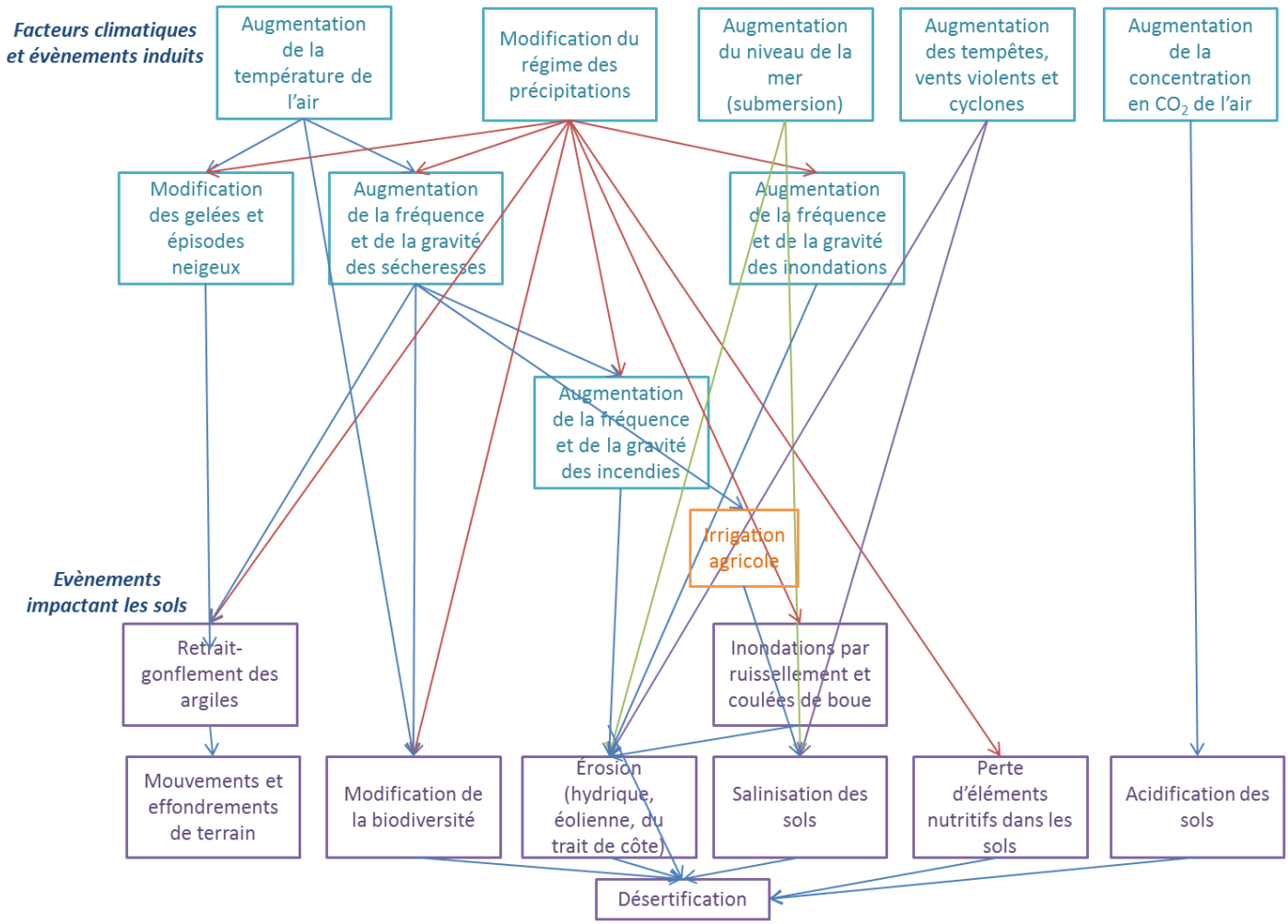


Figure 19 : Carte des processus des facteurs climatiques et évènements induits impactant les sols

1.2. Périmètre Sols

Le périmètre Sols englobe les caractéristiques et propriétés des sols, leurs fonctions écologiques, ainsi que les services écosystémiques qu'ils rendent.

- **Types de milieux**

Milieux naturels	Sous la dénomination de milieux naturels, il s'agit surtout de milieux semi-naturels, pour lesquels l'intervention anthropique est limitée.
Milieux agricoles	Il s'agit ici des milieux agricoles, viticoles et des vergers.
Milieux forestiers	Ce sont des systèmes écologiques couvrant au moins 10 % du sol sur plus de 0,5ha et de plus de 20m de large avec des arbres d'au moins 5m de haut (ou capable d'atteindre ces dimensions), mais n'étant soumis à aucune pratique agricole.
Milieux prairiaux	Ce sont des espaces ouverts, caractérisés par une végétation principalement herbacée, à dominance de graminées.
Zones semi-humides	Il ne s'agit pas de milieux aquatiques, mais d'écosystèmes terrestres à tendance humide, tels que les prairies humides ou les prairies inondables.
Zones urbaines	Ce sont les zones urbanisées telles que les villes, les zones commerciales, industrielles, etc.

- **Caractéristiques des sols**

Texture	La texture indique l'abondance relative, dans le sol, de particules de dimensions variées: sable, limon ou argile. De la texture dépendent la facilité avec laquelle le sol pourra être travaillé, la quantité d'eau et d'air qu'il retient, et la vitesse à laquelle l'eau peut entrer et circuler dans le sol.
Structure	On définit la structure du sol comme le mode d'organisation des différentes particules de sable, de limon et d'argile entre elles. Les particules isolées, une fois assemblées, apparaissent comme des particules plus grosses. C'est ce qu'on appelle des agrégats.
Teneur en matière organique	La matière organique du sol est constituée d'une fraction dite libre (résidus animaux et végétaux, substances organiques chimiquement bien définies, organismes vivants) et d'une fraction dite liée formée de produits relativement stables, adhérant à la fraction minérale, regroupés sous le terme d'humus.
Teneur en nutriments	Ce sont des composés chimiques présents dans le sol, indispensables à la croissance des plantes : l'azote est un constituant des protéines, le potassium intervient dans les équilibres membranaires, le phosphore permet le stockage intermédiaire et l'utilisation de l'énergie dans les cellules. Les nutriments proviennent des activités agricoles, des eaux usées ménagères et de certaines industries.
Humidité / Saturation	L'humidité du sol (ou eau contenue dans le sol) détermine de façon essentielle la variation des caractéristiques de différents matériaux ou sols. Le taux d'humidité d'un sol en particulier va déterminer les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces

	caractéristiques concernent aussi bien les intrants solides que liquides qui vont pénétrer dans le sol.
pH	Le pH, mesure l'acidité ou l'alcalinité du sol. Dans une échelle de 1 à 14, un milieu est neutre quand son pH est de 7. En dessous, il est acide, au-dessus, il est basique ou alcalin. Les sols calcaires sont en général basiques, alors que les sols sableux ou très riches en matière organique (voir humus) sont plutôt acides. La plupart des plantes s'accommodent d'un pH autour de la neutralité (de 6 à 7,5).
Organismes vivants	La biodiversité du sol regroupe l'ensemble des formes de vie qui présentent au moins un stade actif de leur cycle biologique dans le sol. Elle inclut les habitants de la matrice du sol ainsi que ceux de la litière et des bois morts en décomposition. Les organismes du sol sont généralement subdivisés en plusieurs groupes : la mégafaune (taupes, crapauds, serpents, ...), la macrofaune, visible à l'œil nu (vers de terre, termites, fourmis, larves d'insecte, ...), la mésofaune, visible à la loupe (acariens, collemboles, ...), la microfaune, et les micro-organismes, visibles seulement au microscope (protozoaires, nématodes, bactéries, champignons, algues).
Teneur en CO_2 des sols	Il s'agit de la concentration en CO_2 présente dans les sols.
Température des sols	Il s'agit de la température mesurée des sols.

- **Fonctions écologiques**

Filtration et épuration de l'eau	Grâce à ses composantes organiques et inorganiques, les sols constituent un filtre ainsi qu'un moyen d'épuration de l'eau qui les traverse.
Infiltration et rétention de l'eau	Les sols, à travers leur matière organique, la teneur en argile qui les compose ou leur structure ont la capacité à retenir l'eau ou à la laisser s'infiltrer jusqu'aux nappes phréatiques.
Support de la végétation & production de biomasse	Les sols sont le support de la production végétale.
Habitat et réservoir de biodiversité	Les sols constituent un très important réservoir de biodiversité animale, végétale, bactérienne ou encore fongique, puisqu'ils représentent une source d'habitat et/ou d'alimentation, mais aussi d'interactions entre les espèces et individus (prédation, parasitisme, compétition…).
Régulation des cycles biogéochimiques	Le sol est un des compartiments au sein desquels se déroulent les processus de transport et de transformation cyclique d'éléments ou composés chimiques tels que le carbone ou l'azote. Cette fonction inclut donc la décomposition de la matière organique, ainsi que le recyclage des éléments nutritifs, notamment sous l'action des êtres vivants du sol.
Régulation de la température, des précipitations et des processus atmosphériques	Cette fonction écologique inclut les processus d'échanges gazeux entre les végétaux et l'atmosphère (comme l'évapotranspiration), ainsi que les processus influencés par la biologie du sol et ceux liés à l'albédo et la réflexion de la lumière dans le cadre d'une régulation du microclimat local.

- **Services écosystémiques**

Approvisionnement en aliments, fibres, énergie	Ce service correspond à ce qui est cultivé pour la production d'aliments (à partir des cultures, de l'élevage…), de fibres (textile, de bois…) et d'énergie (biocarburants, bois énergie…).
Approvisionnement en matériaux	Il s'agit du sol lui-même ou des parties du sol qui peuvent être utilisées comme matériaux (ex. de la tourbe pour l'horticulture, des argiles pour la céramique ou la pharmacie, de la terre pour la construction de briques…).
Source d'organismes et de gènes d'intérêt pour l'agriculture et l'industrie	Ce service consiste en la fourniture de ressources génétiques utiles pour certains secteurs économiques (agriculture, cosmétique, pharmacie…) parmi les êtres-vivants présents dans les sols.
Support pour les habitations et les infrastructures	Ce service comprend les bâtiments, les routes, les réseaux souterrains (réseaux d'eau, lignes électriques enterrées…), ainsi que les installations de production d'énergies renouvelables tels que l'éolien terrestre ou les centrales photovoltaïques au sol.
Purification et maintien de la qualité de l'air	Il s'agit d'un service rendu notamment par les organismes présents dans les sols, qui de par leur activité favorisent ou non la production de certains composants atmosphériques.
Purification et maintien de la qualité de l'eau	Ce service est rendu d'une part par les êtres vivants des sols (micro-organismes, végétaux…), mais aussi par la partie inorganique jouant le rôle de filtre (argiles…).
Régulation du climat des villes et des bâtiments	Ce service englobe la régulation des îlots de chaleur urbains, en lien avec l'albédo ou l'évapotranspiration par les végétaux, ainsi que la régulation thermique des bâtiments, notamment par des dispositifs de puits thermiques ou de géothermie superficielle horizontale.
Atténuation du changement climatique (stockage du carbone)	Ce service consiste en l'évitement des émissions de gaz à effet de serre (CH_4, N_2O, CO_2) et en le stockage de carbone dans les sols.
Régulation des flux d'eau	Ce service englobe l'approvisionnement en eau, la régulation des risques d'inondations, ainsi que la gestion des eaux de ruissellement urbaines.
Recyclage des déchets, des effluents et des eaux usées	Il s'agit d'un service de recyclage de sous-produits organiques ou inorganiques, valorisables par épandage notamment.
Régulation de la qualité sanitaire des aliments et de l'eau potable	Ce service est lié à la régulation et au contrôle des maladies et pathogènes transitant par le sol.
Services culturels	Les services culturels fournis par les sols sont nombreux et divers : mémoire archéologique, support d'espaces végétalisés pour les loisirs, l'esthétique, le sport, etc. (campings, stades de sport, parcs urbains, jardins d'ornement, pelouses…).
Aides des secteurs économiques agricoles à s'adapter aux sécheresses	Il s'agit d'un service d'adaptation aux sécheresses que les sols peuvent rendre pour des activités économiques telles que l'agriculture ou la sylviculture.

Le schéma ci-dessous illustre le passage des caractéristiques des sols à la fourniture des services écosystémiques.

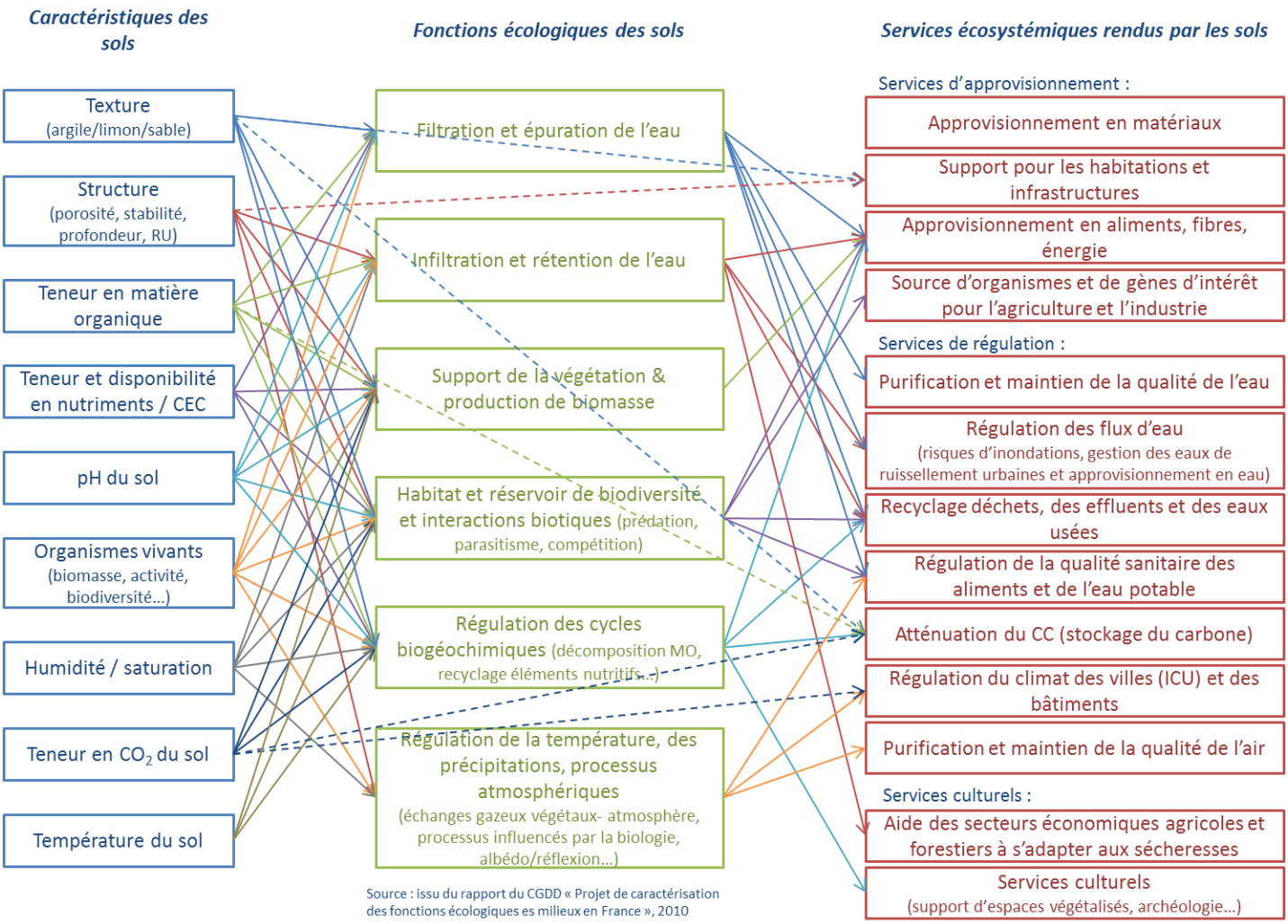


Figure 20 : Carte des processus des liens entre caractéristiques, fonctions écologiques et services écosystémiques

1.3. Périmètre Mesures d'adaptation

Le périmètre « Mesures d'adaptation » présente les principales actions ayant un lien direct avec les sols et permettant de s'adapter au changement climatique.

- **Mesures d'adaptation pour les sols agricoles, forestiers et naturels**

Travail du sol	Le travail du sol (superficiel ou profond) ou l'absence de travail du sol influence des propriétés du sol telles que sa structure, son humidité, les organismes qui y vivent, etc.
Dispositifs externes d'apport et de maintien de l'humidité des sols	Cette mesure recoupe un large éventail de solutions externes permettant la gestion de l'humidité des sols, notamment l'irrigation goutte à goutte, l'utilisation de gels rétenteurs d'eau, les films plastiques, etc.
Choix d'espèces et de variétés	Que ce soit en agriculture, en sylviculture ou en milieux urbains, il s'agit d'installer d'autres espèces et/ou variétés/essences afin de choisir celles qui résisteraient le mieux aux conditions climatiques futures.
Infrastructures agroécologiques	Les infrastructures agroécologiques regroupent des actions d'implantation d'arbres, de haies ou de bandes enherbées sur les territoires (ex. de l'agroforesterie) afin limiter l'érosion, la contamination des eaux superficielles et de favoriser la biodiversité

Assolement et rotation	Il s'agit, en agriculture, de mesures visant à réorganiser les cultures présentes sur un territoire en choisissant d'implanter de nouvelles espèces/variétés afin de diversifier les végétaux présents, mais aussi de favoriser la résistance à des évènements climatiques ou à la migration de pathogènes dans le sols.
Modes de production	Les modes de production englobent diverses pratiques agricoles ou sylvicoles, telles que la modification du calendrier cultural (dates de semis…), le passage à l'agriculture biologique, la limitation de l'utilisation de produits phytosanitaires ou encore l'utilisation d'amendements.
Couverture du sol	Cette mesure regroupe une couverture végétale vivante (plante de couverture, intercalaire, intermédiaire ou associée) ou par des résidus de cultures (mulch).

- **Mesures d'adaptation pour les sols urbains**

Végétalisation des espaces urbains	La mise en place d'arbres, de haies ou de buissons dans les espaces urbains permet de protéger le sol du soleil et de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain.
Végétalisation des bâtiments	La mise en place de toitures végétalisées ou de murs végétalisés protège les bâtiments et le sol du soleil et améliore le confort des habitants.
Perméabilisation des revêtements urbains	La perméabilisation des revêtements urbains (en utilisant des surfaces alvéolées drainantes par exemple) permet en ville, de lutter contre les problèmes d'augmentation du débit des eaux de ruissellement après de fortes pluies, et donc de désengorger les réseaux de collecte en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol.
Construction de digues	Efficace rempart contre la submersion marine, une digue a besoin d'être surveillée et consolidée en permanence (par de coûteux rechargement en sable) pour ne pas céder face à la force des vagues.
Equipement/support de production d'énergies renouvelables	Il s'agit de considérer ici le sol en tant que support pour l'installation d'équipements de production d'énergies renouvelables.

Les schémas ci-dessous illustrent la façon dont les mesures d'adaptation influencent les fonctions écologiques des sols et permettent de se prémunir contre les impacts du changement climatique sur les sols :

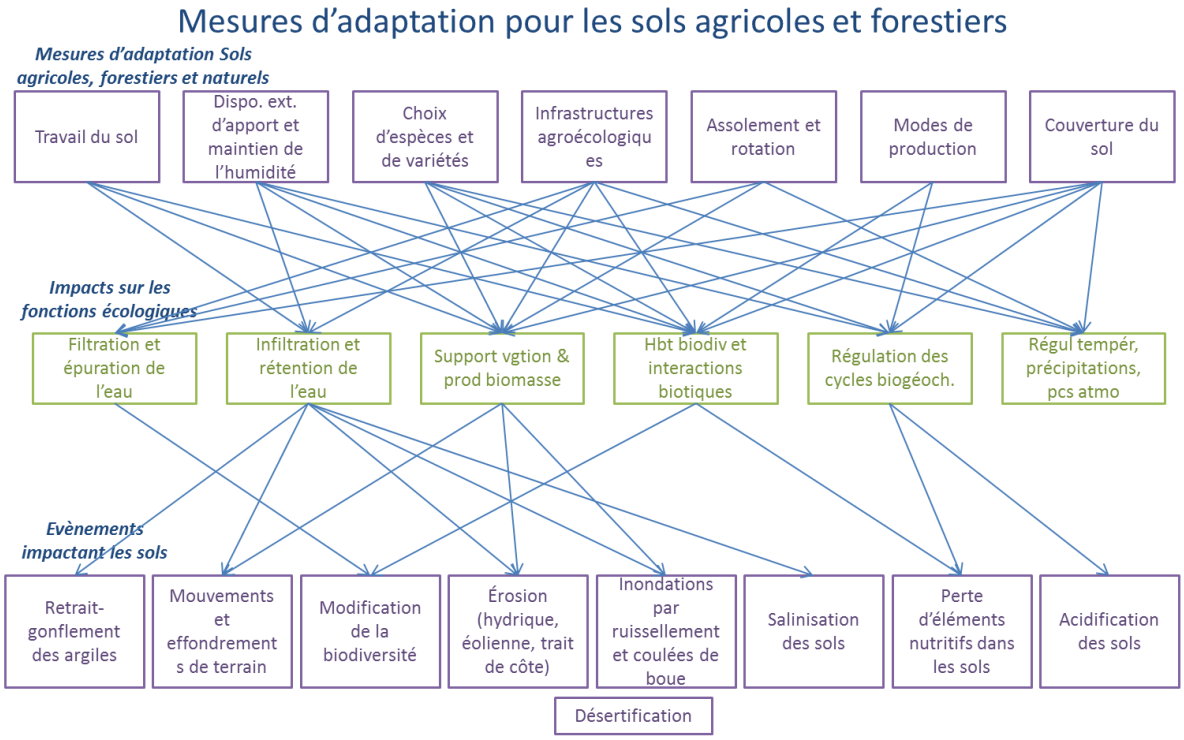


Figure 21 : Carte des processus des mesures d'adaptation pour les sols agricoles et forestiers

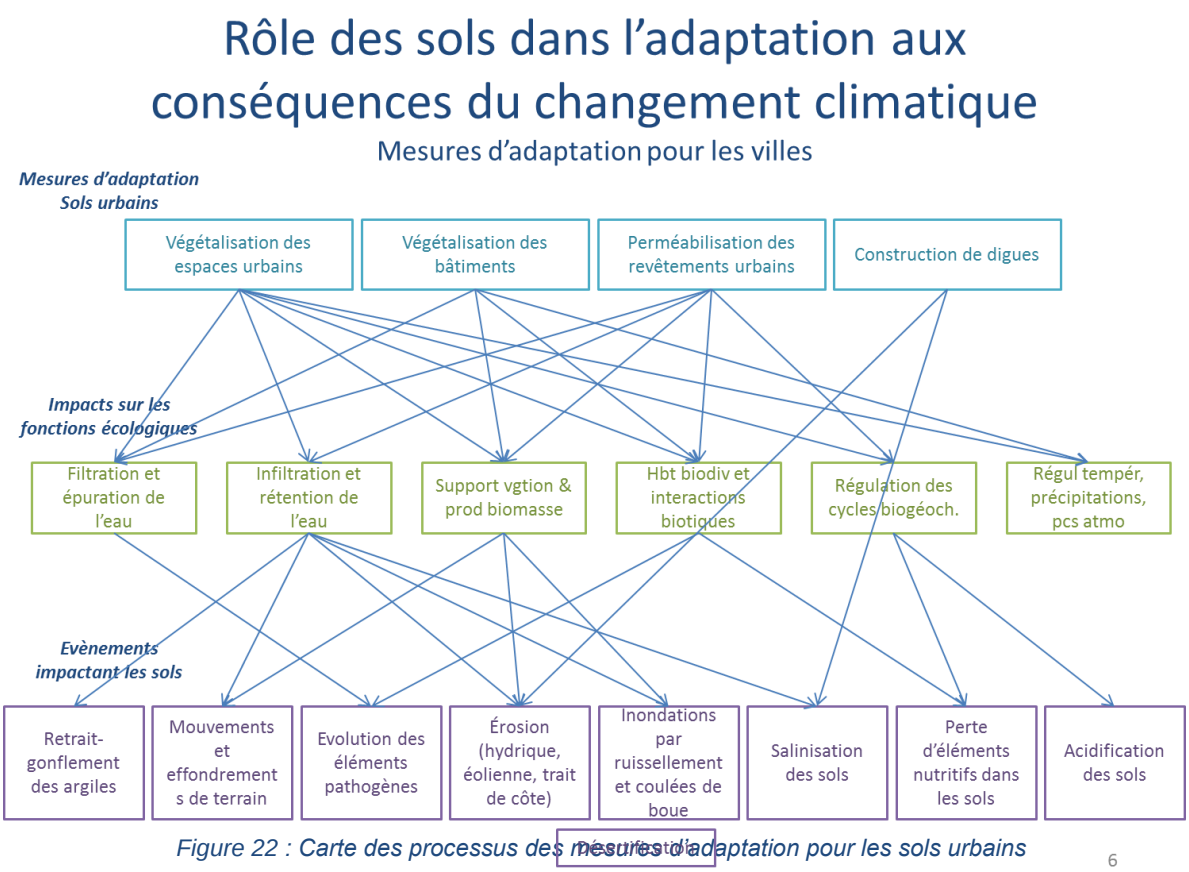
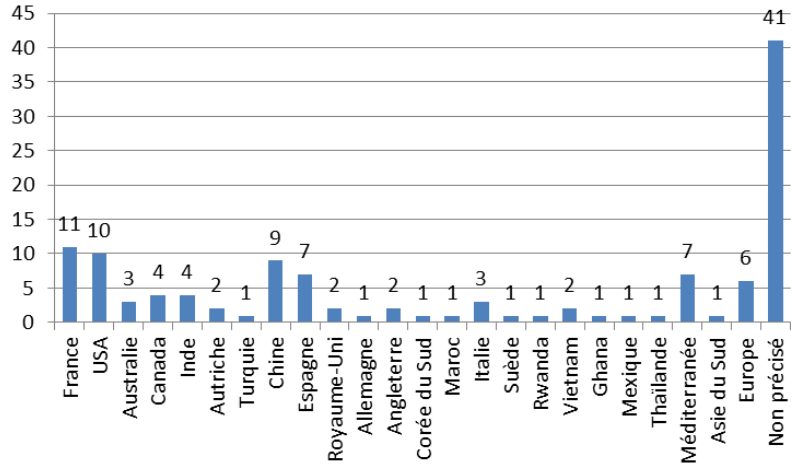


Figure 22 : Carte des processus des mesures d'adaptation pour les sols urbains

Annexe 2 : Analyse du corpus bibliographique

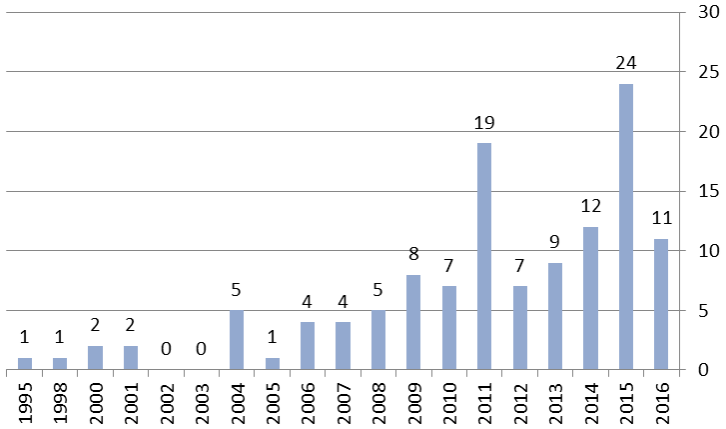
Typologie de documents

Répartition des documents par pays d'étude



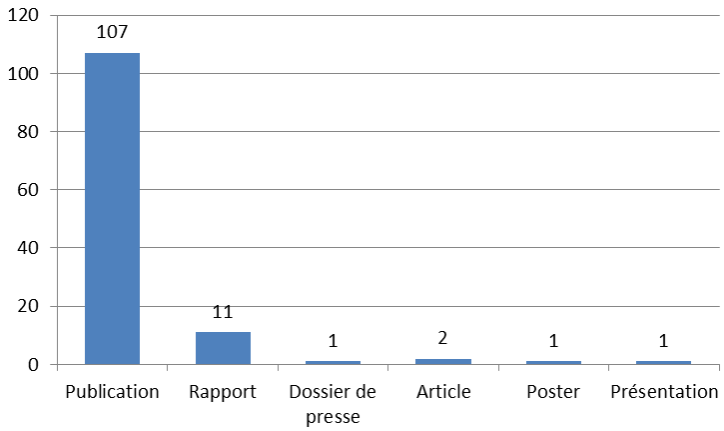
- Environ ¼ des documents étudiés concernent la France ou la région Méditerranéenne (dont le climat actuel pourrait ressembler au climat futur de certaines zones de la France métropolitaine).

Répartition des documents par année de publication



- Environ les deux tiers des documents du corpus étudié ont été publiés les cinq dernières années.

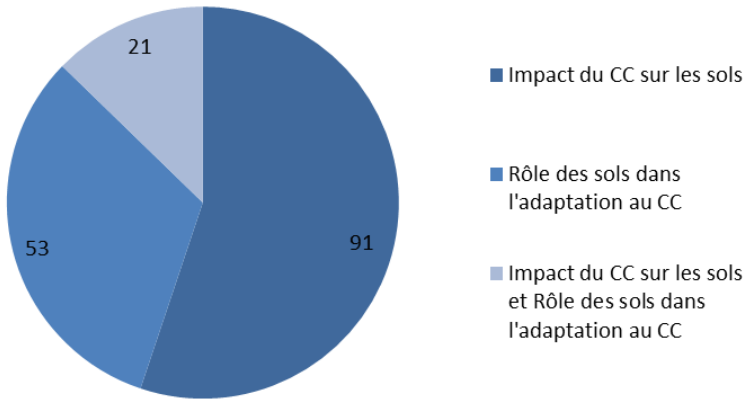
Répartition des documents par type de document



- Une grande majorité des documents étudiés sont des publications scientifiques, viennent ensuite les rapports synthétiques.

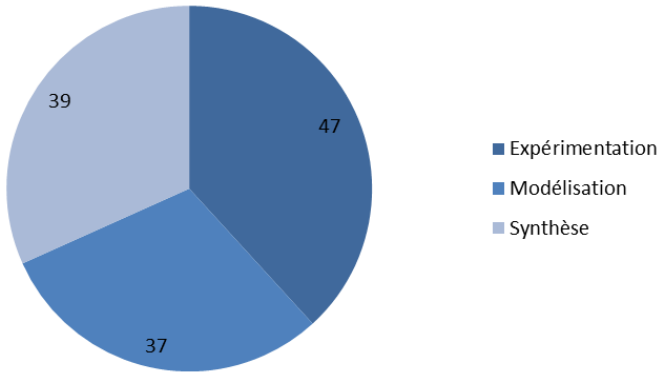
Axes d'analyse de l'étude

Répartition des documents par axe étudié



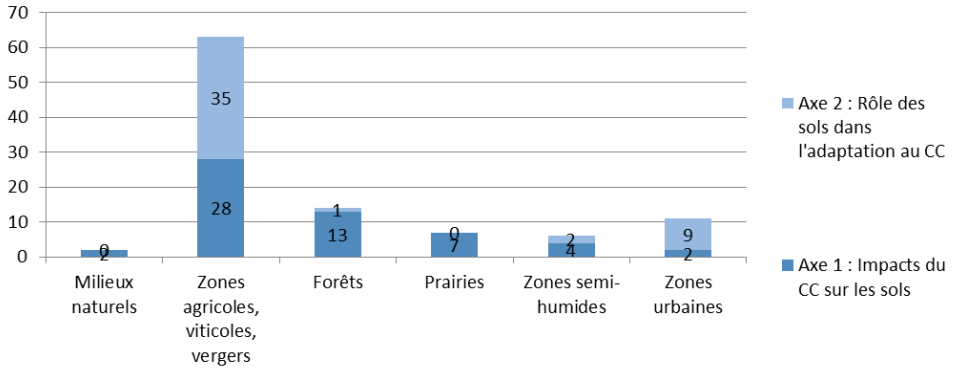
- Une majorité de documents traitant de l'axe 1 de l'étude : les impacts du changement climatique sur les sols.

Répartition des documents par type d'analyse effectuée



- Environ un tiers des documents étudiés sont des synthèses.

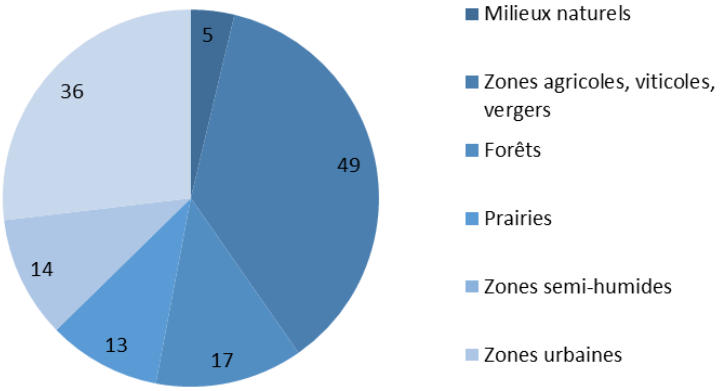
Répartition des documents par milieu étudié et par axe de l'étude



- Une majorité de documents concernent les zones agricoles. Celles-ci sont étudiées aussi bien dans le cadre des impacts du changement climatique sur les sols, que dans le rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique.
- Les forêts et les prairies semblent plus étudiées du point de vue des impacts du changement climatique sur les sols.
- A l'inverse, les zones urbaines semblent plus étudiées du point de vue du rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique.

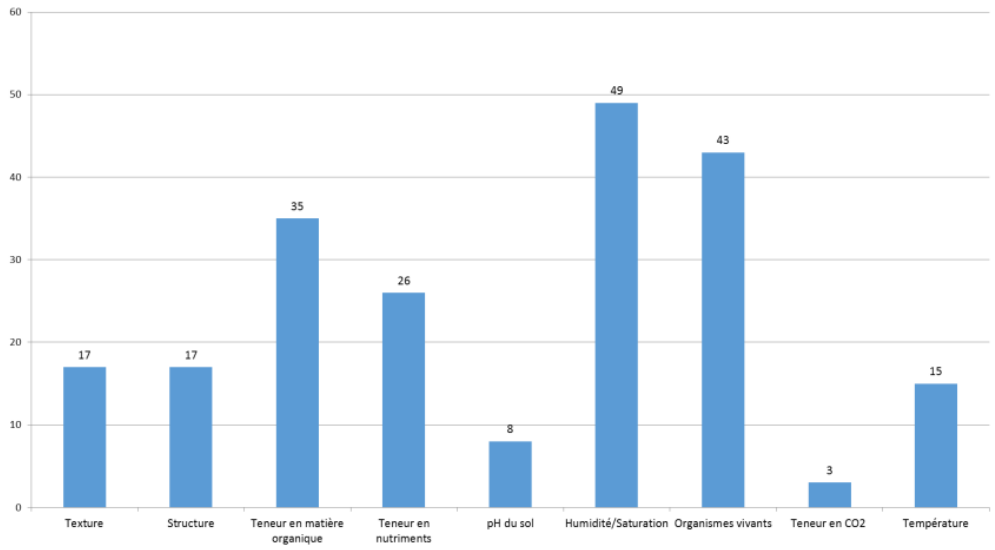
Analyse selon le périmètre Sols

Répartition des documents par milieu étudié



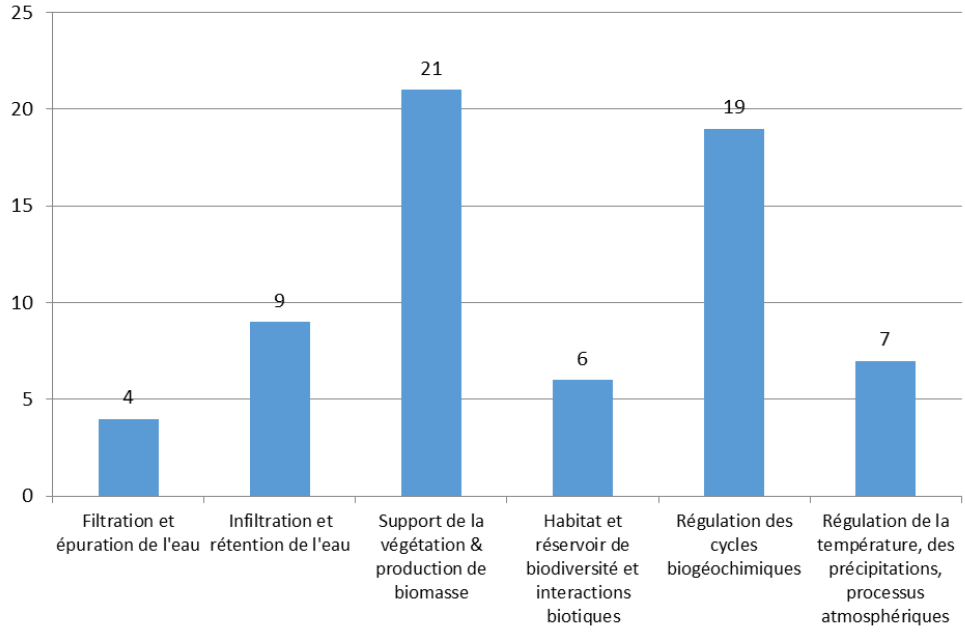
- Une majorité de documents concernent les zones agricoles.

Répartition des documents par caractéristique du sol étudiée



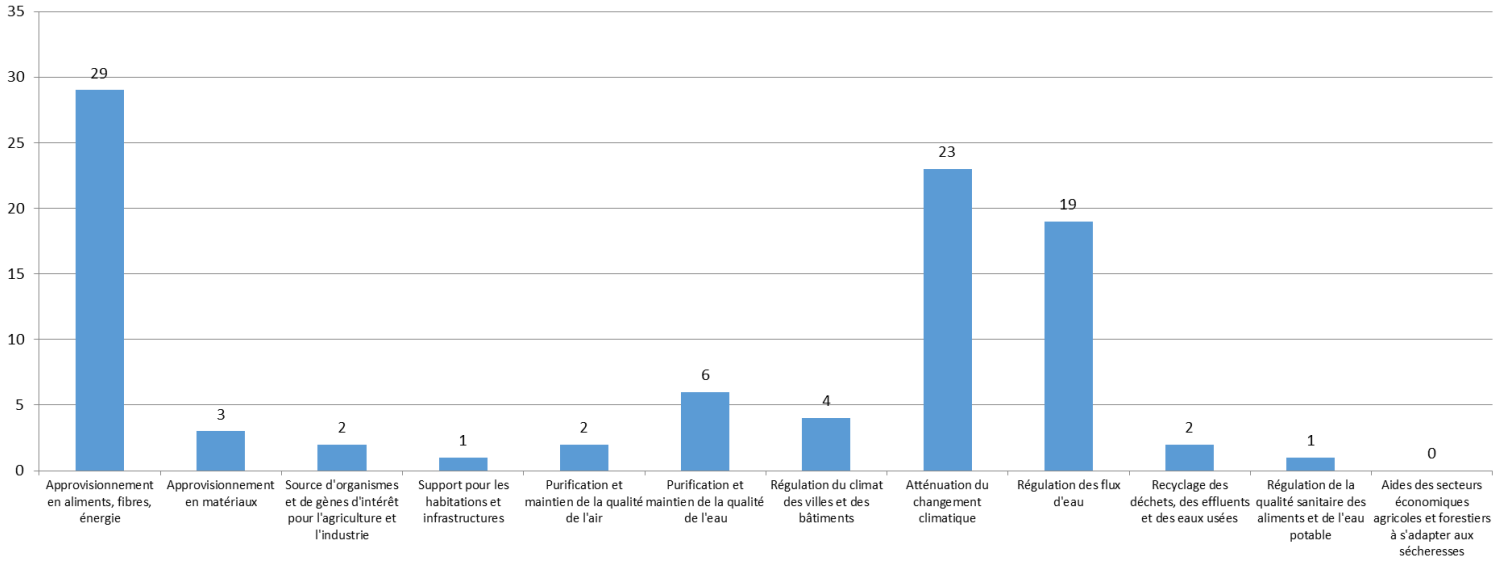
- Les propriétés des sols sont principalement étudiées du point de vue de sa matière organique, de son humidité et des organismes vivants qu'ils abritent.

Répartition des documents par fonction écologique étudiée



- Les principales fonctions écologiques des sols étudiées sont celles de support de végétation & de production de biomasse et de régulation des cycles biogéochimiques.

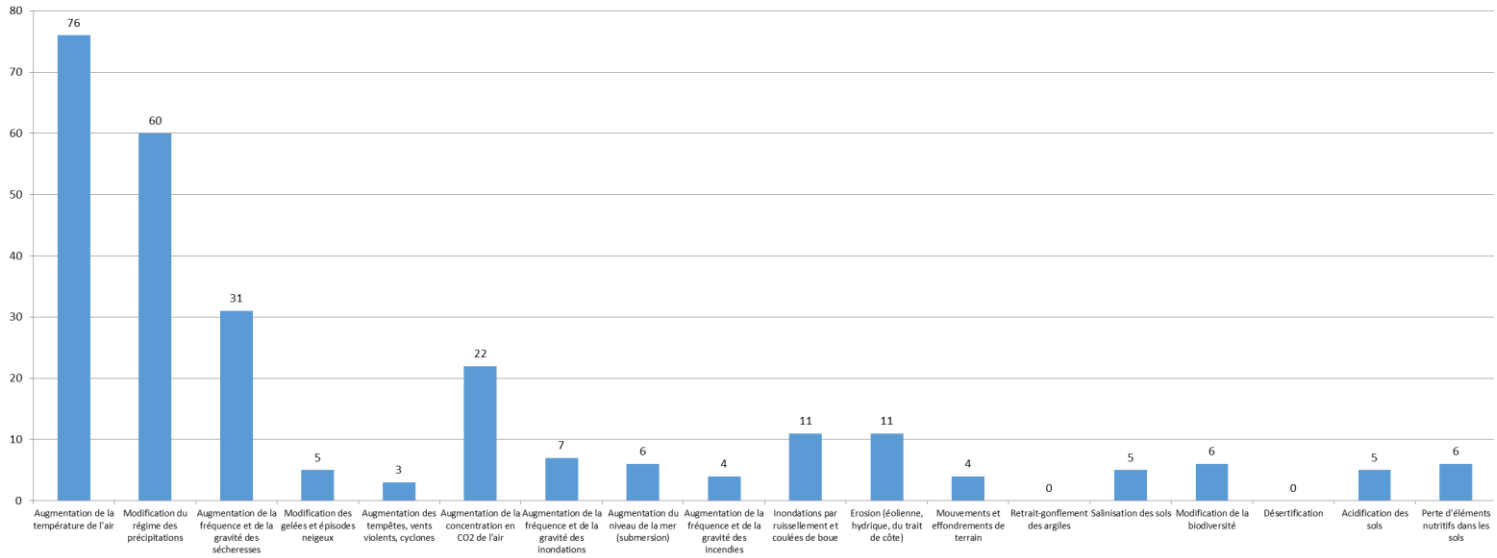
Répartition des documents par service écosystémique étudiée



- Les principaux services écosystémiques étudiés sont ceux relatifs à l'approvisionnement en aliments, fibres et énergie, l'atténuation du changement climatique et la régulation des flux d'eau.

Analyse selon le périmètre Facteurs climatiques

Répartition des documents par facteur climatique étudié

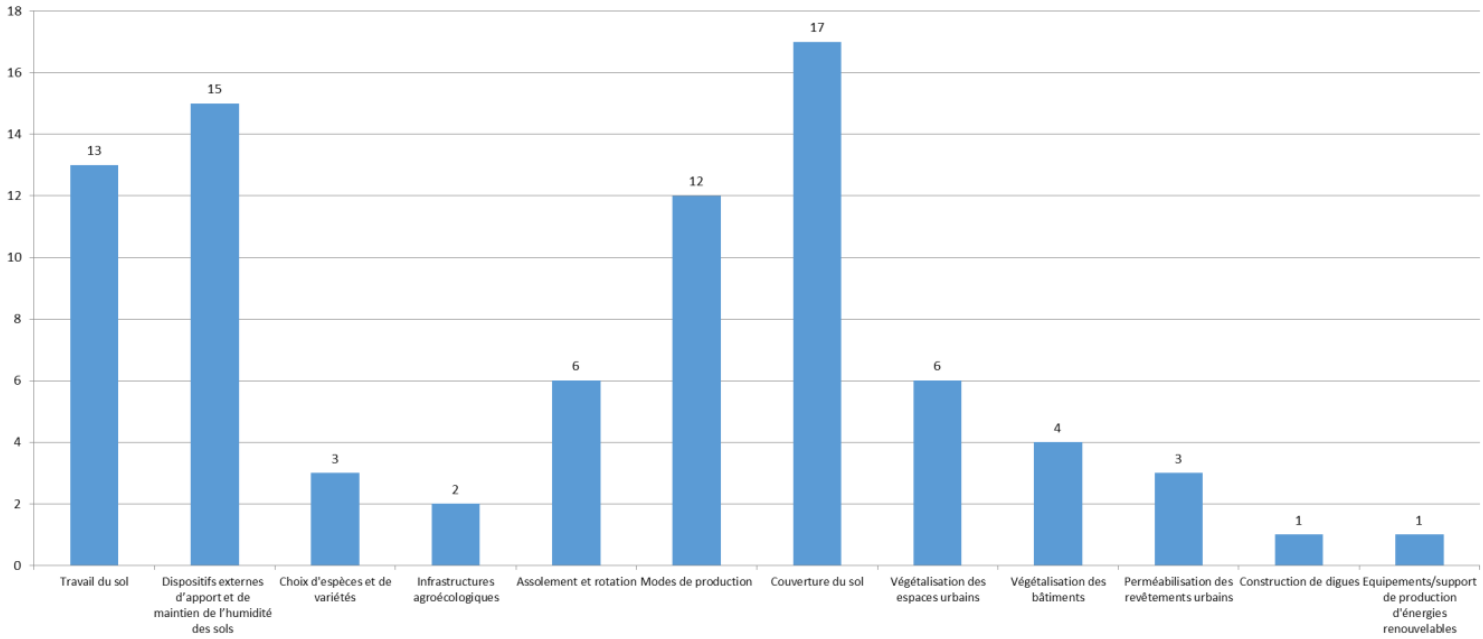


- Les facteurs climatiques et évènements induits pour les sols les plus étudiés sont l'augmentation de la température de l'air, la modification du régime des précipitations, l'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses, ainsi que l'augmentation de la concentration en CO_2 de l'air.

Analyse selon le périmètre Mesures d'adaptation

Répartition des documents par mesure d'adaptation

- Les principales mesures d'adaptation étudiées concernent les mesures liées aux sols agricoles, forestiers et naturels, notamment la couverture du sol, les dispositifs externes d'apport et de maintien de l'humidité des sols et le travail du sol. Parmi les mesures concernant les sols urbains, ce sont les mesures de végétalisation qui semblent les plus étudiées.



Annexe 3 : Les monographies des programmes et projets de recherche étudiant les sols et les changements climatiques

Les projets de recherche achevés

Les monographies étudiées sont les suivantes :

- **CARBO-EXTREME**: EU's 7th Framework Programme for Research and Technological Development
- **CLIMSEC**: Fondation MAIF
- **CLIMATOR** : Agence Nationale de la Recherche (ANR)
- **CLIMSOIL** : Austrian Climate Research Programme (ACRP)
- **URBAN-SMS** : European Regional Development Fund (ERDF), Central Europe Programme
- **MUSCADE** : Agence Nationale de la Recherche (ANR)

PROJET DE RECHERCHE		
CARBO-EXTREME **LE CYCLE DU CARBONE TERRESTRE DANS LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET LES EPISODES EXTREMES**	***Type***	*Projet financé par la Commission Européenne (EU's 7th Framework Programme for Research and Technological Development 2007-2013)*
	Durée	*2009 - 2013*
	Description succincte	*Détermination de la relation entre les évènements climatiques extrêmes et les changements dans le budget carbone des terres émergées européennes.*
	Axe de l'étude	*AXE 1 : Impacts des changements climatiques sur les sols*
	Principales thématiques	*Sécheresses – écosystèmes terrestres – cycle du carbone – eau du sol*

Collaborateurs

Noms
Coordinateur : Dr. Markus Reichstein, Max Planck-Institute of Biogeochemistry (MPG), Allemagne
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Allemagne
University of Antwerp (UA), Belgique
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), France
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH), Allemagne
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IBIMET), Italie
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH ZURICH), Suisse
Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France
National Soil Resources Institute, Cranfield University (CU), Grande Bretagne
National Laboratory for Sustainable Energy, Risø DTU (DTU), Danemark
Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Suède
Universität Innsbruck (UIBK), Autriche
GeoBiosphere Science Centre, Physical Geography and Ecosystems Analysis, Lund University (ULUND), Suède
Fundacion Centro de Estudios Ambientales del Mediterraneo (CEAM), Espagne
Commissariat à l'Énergie Atomique, LSCE (CEA), France
University of Aberdeen (UNIABDN), Royaume-Uni
Universitá della Tuscia (UNITUS), Italie
Institutul de Cercetari si Amenajari Silvice (ICAS), Roumanie
International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Autriche
Natural Environment Research Council (NERC), Royaume-Uni
Free University of Amsterdam (VUA), Pays-Bas
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Suisse
Commissariat à l'Énergie Atomique, LSCE (CEA), France
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK), Allemagne
Université Paris-Sud XI, Faculté d'Orsay (UPS), France
Met Office Hadley Centre for Climate Change (METO), Royaume-Uni

Description du projet de recherche

Carbo-Extreme est un projet sur le cycle du carbone du sol et la variabilité du climat. Il a plusieurs objectifs :

- Améliorer la compréhension du cycle du carbone terrestre en réponse à la variabilité du climat et des phénomènes extrêmes
- Appliquer les connaissances existantes sur l'Europe avec la modélisation prédictive du cycle du carbone terrestre et interpréter les prédictions du modèle en termes de vulnérabilité de la Terre - en particulier le sol - bassins de carbone dans différents scénarios
- Développer une offre de conseils à destination de la Commission européenne et d'autres intervenants afin de soutenir le développement et la mise en œuvre des politiques climatiques, de protection des sols et des écosystèmes.

Le projet s'est déroulé en 9 phases distinctes :

Phase 1 : Soil process studies : Etude d'un ensemble de processus qui influencent la dynamique du Carbone organique du sol (COS) dans le climat futur. Cette étape visait à fournir de nouveaux algorithmes pour le paramétrage des modèles des étapes suivantes.

Phase 2 : Network of Ecosystem Manipulation Experiments : L'objectif était de recueillir de nouvelles données expérimentales sur les réactions des écosystèmes au réchauffement climatique (changement des précipitations et concentration croissante de CO_2…).

Phase 3 : Long Term Carbon Measurements and Climate : L'objectif global était d'exploiter des ensembles de données du cycle du carbone et de formuler des observations à long terme pour comprendre comment la fonction de carbone des écosystèmes répondait à la variabilité du climat.

Phase 4 : Data infrastructure and model support: Le but de cet atelier de travail était de créer l'interface entre les collections de données et les activités de modélisation et d'extraction de données.

Phase 5 : Model-data integration: Le but était d'organiser une utilisation optimale des données des étapes 1-3 pour le modèle de développement structurel.

Phase 6 : Model experiments and scenario analysis: Le but de cet atelier de travail était de fournir des projections spatialement explicites basées sur des scénarios d'émissions du cycle européen du carbone terrestre et les incertitudes associés en appliquant les modèles améliorés et calibrés de la phase 5.

Phase 7 : Carbon vulnerability synthesis: Cette étape a permis de fournir une évaluation intégrée de la vulnérabilité du cycle européen du carbone au changement climatique et aux événements extrêmes.

Phase 8 : Dissemination and Policy interaction : Cet atelier de travail a permis d'assurer une communication bidirectionnelle efficace entre le projet et les parties prenantes européennes concernant les besoins et les implications des résultats obtenus dans CARBO-Extreme.

Phase 9 : Coordination : Au sein de CARBO-Extreme, un groupe de travail a été dédié à l'organisation générale, la gestion et l'administration du projet.

Principaux résultats

Les résultats du projet confirment que les phénomènes climatiques extrêmes influencent fortement les écosystèmes terrestres et le cycle du carbone. Une modification de la variabilité du climat et un nombre croissant de phénomènes météorologiques extrêmes vont augmenter la vulnérabilité des puits de carbone terrestres.

La totalité des terres cultivées, prairies et forêts sont vulnérables aux phénomènes climatiques extrêmes. Le projet a mis en évidence que les impacts des sécheresses sur le cycle de l'eau constituent un risque majeur pour les services écosystémiques liées au cycle du carbone.

La variabilité du climat sera probablement le facteur déterminant, qui limitera la capacité des écosystèmes à s'adapter au changement climatique. Pris dans leur ensemble, les forêts devraient connaître les conséquences les plus importantes. De plus, les conséquences d'évènements extrêmes peuvent largement compenser les effets positifs de la fertilisation par le carbone dans une atmosphère de CO_2 enrichi.

Quelques publications réalisées au cours de ce projet

- Carvalhais, N., Reichstein, M., Ciais, P., Collatz, G.J., Mahecha, M.D., Montagnani, L., Papale, D., Rambal, S. and Seixas, J. (2010) Identification of vegetation and soil carbon pools out of equilibrium in a process model via eddy covariance and biometric constraints. Global Change Biology 16, 2813–2829, Abstract.
- Cotrufo M. F., Alberti G., Inglima I., Marjanovi ´c H., LeCain D., Zaldei A., Peressotti A., and Miglietta F. (2011) Decreased summer drought affects plant productivity and soil carbon dynamics in Mediterranean woodland Biogeosciences 8, 2729-2739. Abstract.
- Foereid B., Bellamy P. H., Holden A., Kirk G. J. D. (2012) On the initialization of soil carbon models and its effects on model predictions for England and Wales. European Journal of Soil Science 63, 32–41. doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01407.x Abstract.
- Fuchslueger L., Bahn M., Fritz K., Hasibeder R., Richter, A. (2014) Experimental drought reduces the transfer of recently fixed plant carbon to soil microbes and alters the bacterial community composition in a mountain meadow. New Phytologist 201: 916–927. DOI: 10.1111/nph.12569 Abstract.
- Klumpp K., Tallec T., Guix N., Soussana J.F. (2011) Long-term impacts of agricultural practises and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture. Global Change Biology, Volume 17, Issue 12, Pages: 3534–3545. Abstract
- Rammig, A., Wiedermann, M., Donges, J. F., Babst, F., von Bloh, W., Frank, D., Thonicke, K., and Mahecha, M. D. (2015) Coincidences of climate extremes and anomalous vegetation responses: comparing tree ring patterns to simulated productivity, Biogeosciences, 12, 373-385, doi:10.5194/bg-12-373-2015 Abstract.
- Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M., Seneviratne, S. I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., Frank, D., Papale, D., Rammig, A., Smith, P., Thonicke, K., van der Velde, M., Vicca, S., Walz, A., and Wattenbach, M. (2013) Climate extremes and the carbon cycle. Nature 500, 287–295, doi: 10.1038/nature12350 Abstract
- Smith P. and Olesen J.E. (2010): CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURE PAPER Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. Journal of Agricultural Science 148, 543–552.Abstract.

Ressources / aller plus loin

Le site du projet : http://www.carbo-extreme.eu/

PROJET DE RECHERCHE		
CLIMSEC **IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE SUR LA SECHERESSE ET L'EAU DU SOL**	***Type***	*Projet financé par la fondation MAIF*
	Durée	*2008 - 2011*
	Description succincte	*Etude de l'évolution passée et future des réserves d'eau des couches superficielles des sols, avec un accent sur la définition et la mise en œuvre d'indicateurs de sècheresse permettant de caractériser la typologie de ces événements.*
	Axe de l'étude	*AXE 1 : Impacts des changements climatiques sur les sols*
	Principales thématiques	*Précipitations – eau du sol*

Collaborateurs

Noms	Pays
Coordinateur : Direction de la Climatologie de Météo-France - Jean-Michel Soubeyroux CNRM / GAME - Centre national de recherches météorologiques / Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique CERFACS - Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique CEMAGREF - Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement MINES ParisTech SISYPHE - Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux	France

Description du projet de recherche

Le projet CLIMSEC, à vocation de recherche appliquée, a visé à exploiter les modèles numériques existants et les simulations déjà menées afin de définir des indicateurs de sécheresse, les étudier sur une période récente et suivre leur évolution au cours du temps. Ce projet a été mené en deux phases distinctes :

- **Phase 1 : Etude de la variabilité de l'eau du sol sur la période 1958-2008 sur la France**

Le modèle hydrométéorologique SIM (Safran-Isba-Modcou) issu du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) est utilisé par Météo-France depuis 2003. Il permet d'assurer un suivi continu et quotidien des paramètres atmosphériques de surface, des bilans d'eau et d'énergie à échelle fine sur l'ensemble de la France.

- Une première étape a consisté à étendre l'analyse SIM actuelle qui couvrait la période 1970-2007 à la période 1958-2008, permettant ainsi de disposer d'une base de données d'eau dans le sol de 50 ans sur l'ensemble de la France.
- La seconde étape a porté sur l'analyse de la climatologie 1958-2008 précédemment reconstituée. Une attention particulière a été portée sur la définition d'indicateurs de sécheresse basés sur l'utilisation des paramètres SIM : utilisation de l'indice d'humidité des sols intégré et indices basés sur les précipitations et les débits. Le choix s'est finalement porté sur des indicateurs standardisés permettant l'identification des différents paramètres des sécheresses et des analyses spatio-temporelles sur le territoire.

- **Phase 2 : Impact des changements climatiques sur l'eau du sol**

La seconde partie de l'étude s'est appuyée sur les différentes projections climatiques issues des travaux du GIEC ayant bénéficié d'une régionalisation sur la France, et a permis de générer de nouvelles simulations hydrologiques avec la chaîne Isba/Modcou à partir de ces projections.

Principaux résultats

Les principaux résultats ont été présentés en suivant la logique temporelle : climat passé et climat futur.

- **Climat passé**

Une climatologie originale de l'humidité du sol sur la période 1958-2008 à haute résolution spatio-temporelle a été réalisée sur la France. Elle a mis en évidence les variations régionales et saisonnières de ce paramètre (sols plus secs sur les régions Méditerranéennes mais aussi dans l'Ouest) ainsi que les tendances statistiquement significatives de l'assèchement des sols sur le pays, et notamment en hiver et début de printemps sur une large moitié sud et en été dans les zones de montagne.

Des indicateurs standardisés de sècheresse, conformes aux préconisations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), ont été définis. La construction de ces indicateurs permet d'étudier de manière cohérente la propagation des sècheresses tout au long du cycle hydrologique aux différentes échelles de temps et d'espace : du déficit de précipitation à l'assèchement des sols et la diminution des écoulements.

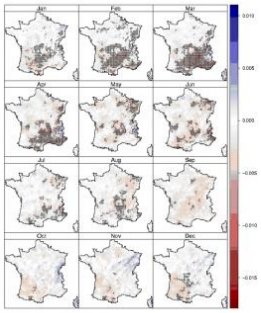


Figure 1 : Tendances linéaires du SWI (an-1) sur la période 1958-2008

- **Climat futur :**

L'analyse des différentes sources d'incertitude (modèles climatiques, scénarios de concentration, méthode de désagrégation) dans l'évolution attendue des sècheresses au XXIe siècle, a permis de mettre en évidence leur variabilité spatiale et leur évolution temporelle : pour les modèles climatiques, les incertitudes dans la représentation des sècheresses des sols sont beaucoup plus fortes que celles des sècheresses météorologiques.

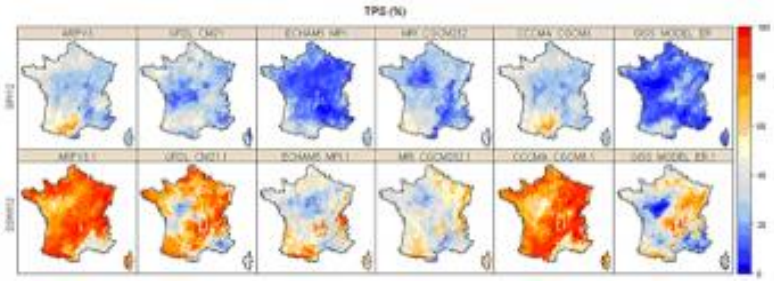


Figure 2 : Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS), selon le SPI et le SSWI, intégré sur 12 mois, pour 6 modèles de GIEC

Quelques publications réalisées au cours de ce projet

- Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyroux, J.-M. (2010a), A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International Journal of Climatology, 30(11), 1627–1644. DOI : 10.1002/joc.2003
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010b), Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. Hydrology and Earth System Sciences, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459-2010
  Prix Norbert Gerbier Mumm 2010 de l'OMM
- Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Baillon, M., Blanchard, M., Céron, J.-P., Franchistéguy, L., Régimbeau, F., Martin, E. & Vincendon, J.-C. (2010) Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou. La Houille Blanche, (5), 30-39. DOI : 10.1051/lhb/2010051
- Soubeyroux, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P., Martin, E. & Dandin, P. (2012) Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. La Météorologie, 78, 21-30. DOI : 10.4267/2042/47512
- Vidal, J.-P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J. & Soubeyroux, J.-M. (2012) Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. Hydrology and Earth System Sciences, 16(8), 2935-2955. DOI : 10.5194/hess-16-2935-2012

Ressources / aller plus loin

Le site du projet : http://www.cnrm-game.fr

Le rapport final : http://www.cnrm-game.fr/IMG/pdf/2011_fmaif_rapport_final_v2.2.pdf

PROJET DE RECHERCHE		
CLIMATOR ***ELABORATION D'OUTILS ET DE REFERENCES POUR L'ANALYSE DE LA VULNERABILITE DES AGRO-ECOSYSTEMES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE***	***Type***	*Projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) : Vulnérabilité : milieux, climat et sociétés, 2006*
	Durée	*2007 - 2010*
	Description succincte	*Etude de l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle, et dans des climats contrastés français.*
	Axe de l'étude	*AXE 1 : Impacts des changements climatiques sur les sols*
	Principales thématiques	*Précipitations – sécheresses – cycle du carbone*

Collaborateurs

Noms	Pays
Coordinateur : INRA – Institut National de la Recherche Agronomique – Nadine Brisson Météo France CNRM/GMGEC/EAC - Centre national de recherches météorologiques/ Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat/ Equipe ARPEGE-Climat Centre national de la recherche scientifique - CNRS Montpellier SupAgro Arvalis – Institut du végétal Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes CERFACS – Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique AgroParisTech	France

Description du projet de recherche

L'objectif du projet était de traduire les hypothèses climatiques en impacts chiffrés pour distinguer les effets positifs, négatifs ou non significatifs qu'induisent ces hypothèses sur l'agriculture et la forêt françaises, dans leur dimension uniquement biotechnique.

La matière organique contient entre 50 et 60 % de carbone. Parmi ses fonctions, la matière organique contribue à conserver la structure et la porosité du sol (effet sur le stockage d'eau, l'aération et le risque d'érosion), à stimuler l'activité biologique et à préserver la biodiversité du sol, à fournir des nutriments à la plante (azote, phosphore, soufre, etc.) et à retenir certains micropolluants (effet sur la qualité de l'eau). La teneur en C organique dans un sol est le produit d'un bilan d'entrées et de sorties pendant une période donnée. Ce bilan peut être positif (stockage), négatif (déstockage) ou nul.

Une variation de la teneur en C organique dans les sols, à cause par exemple du changement climatique, peut avoir des impacts considérables sur le C atmosphérique, impliquant une accentuation (déstockage) ou, au contraire, une atténuation (stockage) du réchauffement. L'une des parties du projet concernait

chapitre	fiches	Sous-titre
La méthodologie	Climat	L'évolution du climat en France basée sur les projections climatiques utilisées dans CLIMATOR au travers de quelques indicateurs agroclimatiques
	Agriculture	Quelle agriculture dans ? Choix des sites, des systèmes agricoles et forestiers et des sols
	Modèles	Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en oeuvre
	Incertitudes	Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités
Les thèmes	Timing	Anticipation des stades phénologiques, raccourcissement des phases et conséquences calendaires
	Eau	Confort hydrique et restitution aux nappes
	Irrigation	Evolution des besoins en irrigation des cultures
	Matière organique	Stockage et déstockage de carbone dans le sol
	Santé	Evolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne
	Rendement	La complexité des évolutions de rendement
Les cultures	Atouts et vulnérabilités	Analyse des facteurs favorables et défavorables à la réalisation des cultures
	Blé Mais et Sorgho Colza Tournesol Vigne Prairie Forêt	L'essentiel des impacts du changement climatique par culture et/ou filière
	Agribio	Analyse d'un exemple d'agriculture biologique en grandes cultures
Les régions	Géoclimatologie	Analyses du potentiel de déplacement géographique des cultures et des essences forestières
	Centre Nord Nord Est Ouest Centre Est Sud Est Sud Ouest Antilles	Evolution des cultures emblématiques et opportunité de nouvelles cultures à partir du ou des sites étudiés dans la zone

Figure 1 : Extrait du Livre Vert du projet

l'évolution du stockage de carbone dans les sols. L'approche territoriale s'appuyait sur 13 sites représentatifs des climats français.

Afin de réaliser des projections climatiques à échelle fine sur la France, un certain nombre de simulations de l'évolution du climat de 1950 à 2100 a été réalisé à l'aide d'un modèle climatique régional, le modèle atmosphérique ARPEGE. Pour les sols, deux niveaux d'approche ont été adoptés :

- **Première approche**

Pour un regard à court terme, l'équipe du projet a proposé l'utilisation d'un sol commun à tous les couverts qui permet la comparaison des systèmes de culture dans leur fonctionnement annuel.

- **Deuxième approche**

Pour un regard à long terme et plus pragmatique, l'équipe du projet a caractérisé les sols par types de couvert. La spécificité géographique des sols a été jugée secondaire dans le projet, ce qui se justifie à l'échelle nationale.

Le choix de sites, systèmes, modèles, sols et décisions techniques a permis de balayer statistiquement une grande gamme de combinaisons possibles. L'analyse statistique des variables a permis de hiérarchiser les principales sources de variations entrainées par les différentes modalités des facteurs, ainsi que leurs principales interactions.

Principaux résultats

L'évolution de la matière organique du sol doit être analysée en tenant compte de l'ensemble des variables de l'agrosystème. En effet, près de 60% de l'impact du changement climatique sur la dynamique de la matière organique est dû aux interactions entre système de culture x site x période x sol.

Le projet a permis de conclure que parmi les variables précédentes, la variable « système de culture » est la plus impactante sur la matière organique. Le système de culture intervient au niveau de la gestion des résidus (enfouis ou enlevés) et de la minéralisation via le degré de recouvrement et les pratiques.

Ces facteurs expliquent les différences, d'une part, entre les rotations et la prairie (nettement stockants) et les cultures annuelles (stockage ou déstockage) et, d'autre part, entre les cultures annuelles.

L'effet du sol est surtout lié à sa teneur en matière organique: les sols les plus riches en matière organique stockent moins de carbone et déstockant plus, en fonction du système de culture. La dynamique de la matière organique est peu sensible aux variations climatiques annuelles, et elle reflète davantage les effets des composantes du système à moyen et long terme. La faible réactivité de la MO en instantané peut cacher un processus de dégradation du sol, d'où l'importance du suivi de leur qualité avec des indicateurs plus fins (biomasse microbienne, activité biologique, fractions labiles).

Ressources / aller plus loin

Le site du projet : http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/

Le livre vert : http://www.cerfacs.fr/~page/publications/livre_vert_climator/livre_vert_climator.pdf

La synthèse : http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/images/synthese-Livre-Vert.pdf

PROJET DE RECHERCHE		
CLIMSOIL	**Type**	*Projet financé par l'Austrian Climate Research Programme (ACRP) 2010-2012*
	Durée	*2010 - 2012*
	Description succincte	*Base de données SIG et méthodologie pour estimer les impacts du changement climatique sur la température du sol et les risques connexes pour l'agriculture autrichienne*
	Axe de l'étude	*AXE 1 : Impacts des changements climatiques sur les sols*
	Principales thématiques	*Températures – températures du sol – cycle du carbone*

Collaborateurs

Noms
Federal Agency for Water Management, Autriche
LFZ-Raumberg-Gumpenstein, Autriche
Federal Office of Food Safety, Institute for Plant Health, Autriche
BOKU Department of Water, Atmosphere and Environment, Institute of Meteorology, Autriche
Bioforschung, Autriche

Description du projet de recherche

Le but du projet était de développer une base de données SIG, sur la base d'une carte électronique autrichienne du sol (www.bodenkarte.at), construite à partir des propriétés physiques et des simulations de température pour les sols agricoles en Autriche.

Dans la première étape du projet, des mesures de température des sols agricoles (terres arables et prairies) ont été réalisées sur le terrain autrichien afin de construire un modèle de simulation de la température des sols agricoles.

Ce modèle, associé à la base de données SIG, a été ensuite utilisé dans deux régions pour établir des scénarios climatiques. L'analyse de la température s'est reposée sur la répartition de deux ravageurs : le Chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera virgifera*) et le ver blanc.

Figure 1 : Présentation du périmètre

- Objectif 1: améliorer et étendre la base de données sur les sols autrichiens concernant la physique du sol (propriétés de transfert de chaleur) afin de tester et comparer les différents algorithmes de modèle pour le sol en fonction de la base de données spatiales de sol disponible ;
- Objectif 2: paramétrer, calibrer et valider les modèles d'impact de la température. Cela comprend l'élaboration et l'étalonnage des modèles de phénologie de *Diabrotica virgifera virgifera* et du *ver blanc* dans la prairie, en ce qui concerne la température du sol. Pour les processus et les fonctions du sol, les modèles ont été validés en prenant en compte la phénologie de la culture, l'équilibre du nitrogène et la dynamique de la matière organique sur trois régions cibles sélectionnées ;
- Objectif 3: développer et calibrer un algorithme approprié pour la mise en œuvre de SIG et créer des cartes spatiales de la température du sol pour différents scénarios ;

- Objectif 4: démontrer des applications de cartes de température du sol et des scénarios d'évaluation des impacts du changement climatique et des options d'adaptation pour les régions cibles sélectionnés en Autriche (Surveillance / prédiction de sous terre ravageur phénologie; application de deux modèles de ravageurs …).

Principaux résultats

Le modèle de la température du sol *SoilTempSim* est un simulateur de la variation dans le temps de la température du sol (pas de temps : un jour). Comme données d'entrée, il utilise des données relatives à la physique du sol, à la température de l'air, de la neige et de la couverture végétale du sol, le rayonnement global, l'albédo, l'évapotranspiration réelle et la teneur en eau du sol.

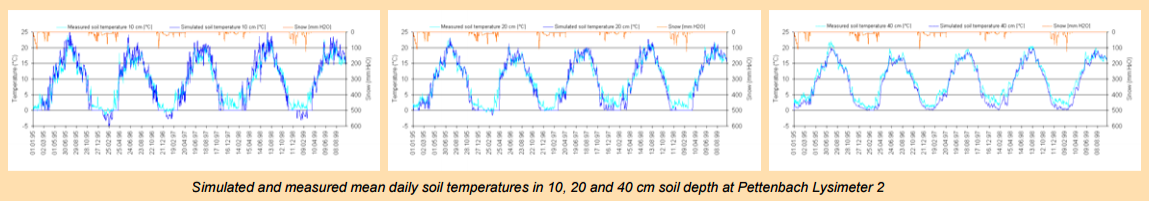


Figure 2 : Illustration des simulations du logiciel SoilTempSim

Le modèle réalise une simulation de la température du sol en fonction de la profondeur du sol considéré. Le coefficient de corrélation (R2) entre les données simulées et mesurées varie de 0,95 à 0,97 (10 et 40 cm de profondeur). Certains écarts pertinents peuvent être observés en hiver avec la couverture de neige. D'autres travaux seront effectués pour valider le modèle de la température du sol dans d'autres régions du climat autrichien et différents types de sols et de cultures.

Ressources / aller plus loin

Le site internet : https://climsoil.boku.ac.at/project_info.html

PROJET DE RECHERCHE		
URBAN-SMS **SOIL MANAGEMENT STRATEGY**	***Type***	*Projet financé par European Regional Development Fund (ERDF) du Central Europe Programme*
	Durée	*2008 - 2012*
	Description succincte	*Développer et d'établir une stratégie de gestion du sol complet pour les municipalités d'Europe centrale et aider les urbanistes* *de considérer la valeur des sols et de leurs différentes fonctions au sein du processus de planification*
	Axe de l'étude	*AXE 2 : Rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique*
	Principales thématiques	*Elaboration de stratégies d'urbanisme en prenant en compte la valeur du sol*

Collaborateurs

Noms
Partenaires
Coordinateur : City of Stuttgart, Department for Environmental Protection, Allemagne
City of Vienna, Department for Environmental Protection, Autriche
Umweltbundesamt, Environment Agency Austria, Vienne, Autriche
City of Milan, Executive Plans and Programs for Buildings Department – Office for Reclamation, Italie
University of Torino, Department of Valorization and Protection of Agroforestry Resources, Italie
City of Celje, Slovénie
Agricultural Institute of Slovenia, Centre for Soil and Environment Research, Ljubljana, Slovénie
Institute of Soil Science and Plant Cultivation, Pulawy, Pologne
Czech University of Life Sciences, Prague, République Tchèque
Soil Science and Conservation Research Institute, Bratislava, Slovaquie
District Authority of Stuttgart, Unit for Water and Soil, Allemagne
Institutions associées
City of Bratislava, Slovaquie
City of Prague, République Tchèque
Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Autriche
Austrian Soil Science Society, Autriche
Province Salzburg, Autriche
Province Upper, Autriche
City of Linz, Autriche
European Land and Soil Alliance (ELSA)
City of Munich, Allemagne
City of Wroclaw, Pologne

Description du projet de recherche

L'objectif général de la gestion des sols dans les zones urbanisées est d'assurer l'utilisation durable des ressources (quantité et qualité des sols) afin de maintenir de bonnes conditions environnementales et des écosystèmes terrestres sains.

L'état des connaissances et des capacités techniques pertinentes pour la protection des sols et de leurs fonctions écologiques en Europe ont été évalués. Les résultats ont été annoncés dans la «Déclaration de Stuttgart», qui souligne l'urgence de développer un concept de gestion des sols axée sur l'applicabilité dans les procédures de planification urbaine.

Pour définir, concevoir et développer une gestion efficace des sols, plusieurs stratégies et exemples de meilleures pratiques appropriées ont été compilés. Sur cette base, des outils logiciels nécessaires pour la mise en œuvre ont été développés.

Les URBAN stratégies et les méthodes SMS ont été testées sur un ensemble de 15 sites pilotes dans les villes partenaires ou des régions, et les expériences de ces tests ont été analysées pour améliorer encore l'approche initiale.

Plusieurs mesures ont été analysées en lien avec les fonctions du sol et leurs rôles dans l'adaptation au changement climatique : suppression du scellement, application de la couche arable, irrigation (restauration du biotope naturel), extensification de l'utilisation des terres arables, décompactage, prévention de l'érosion, chaulage du sol, végétalisation des toitures, revêtement des structures physiques…

Principaux résultats

Le projet a fourni plusieurs outils opérationnels:

- Des outils informatiques prêts à l'emploi au sein de la planification urbaine fournissant un outil de bureau et un outil de planification SIG web pour l'évaluation des sols ;
- Un manuel destiné aux décideurs municipaux donnant des conseils pratiques sur comment mettre en œuvre une structure de gestion permanente pour la protection des sols dans la planification urbaine (processus de sensibilisation des décideurs et des planificateurs urbains pour se renseigner sur le sol importance, les problèmes et les risques liés aux sols dans les villes, la nécessité d'une gestion des sols urbains bon et le bénéfice qui en résulte) ;
- Une compilation de scénarios de consommation des sols, l'évaluation des mesures de compensation et les résultats des ateliers de parties prenantes, y compris un film sur les conséquences de la consommation du sol.

URBAN SMS a contribué à atteindre l'objectif général européen d'établir une stratégie de gestion territoriale globale et fonctionnelle en Europe afin de protéger le sol comme une ressource naturelle dans les zones urbaines, afin de préserver et de le conserver pour les générations à venir.

Les bénéficiaires directs sont les municipalités et les gouvernements régionaux, les acteurs du secteur public dans le domaine de la planification de l'utilisation des terres et de protection de l'environnement ainsi que les promoteurs immobiliers et, enfin, la société tout entière que la gestion des sols urbains améliorée contribuera à la conservation des sols comme l'un des principaux ressources naturelles.

Ressources / aller plus loin

Le site du projet : http://www.carbo-extreme.eu/

La brochure du projet : http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/inhalte/urbansms/pdf_files/final_results/

URBAN_SMS_Brochure_for_Internet.pdf

PROJET DE RECHERCHE		
MUSCADE **MODELISATION URBAINE ET STRATEGIE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR ANTICIPER LA DEMANDE ET LA PRODUCTION ÉNERGETIQUE**	***Type***	*Projet financé par ANR Ville Durable, 2009*
	Durée	*2009 - 2013*
	Description succincte	*Etude des interactions entre différents processus (la végétalisation des toits, la forme urbaine, le verdissement de la ville) et proposition des stratégies d'adaptation qui mettent en perspective la consommation énergétique de la ville et ses capacités de production d'énergie*
	Axe de l'étude	*AXE 2 : Rôle des sols dans l'adaptation au CC*
	Principales thématiques	*Mise en place de nouvelles structures pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain*

Collaborateurs

Noms	Pays
Partenaires Coordinateur : Valéry Masson, Centre National de Recherche Météorologique de Météo-France – Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique (GAME- CNRM) Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) LIttoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs), Unité Mixte de Recherche (CNRS / Université de La Rochelle) Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA) Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) GEOgraphie De l'Environnement (GEODE) Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France (IAU IdF)	France

Description du projet de recherche

Le projet MUSCADE propose d'étudier les interactions entre les processus de développement urbain, de microclimat urbain et le changement climatique. L'évaluation scientifique, à l'aide d'indicateurs multicritères, apporte des pistes pour l'adaptation de la ville au changement climatique, en identifiant d'une part les leviers socio-économiques qui agissent sur les processus d'expansion urbaine, et d'autre part les impacts de leur interaction avec le changement climatique, en terme de microclimat urbain, consommation énergétique, confort des habitants, végétalisation du bâtiment.

La méthode du projet se décompose en 5 étapes :

1) La définition de bases de données pour les trois échelles intervenant dans le système ville ;
2) La définition de scénarios prospectifs (ou récits) par consultation d'experts ;
3) La mise en œuvre de modèles prospectifs traduisant les différents scénarios préétablis ;
4) La simulation « physique » des différentes villes créées par les modèles prospectifs ;
5) L'évaluation de ces villes au travers d'une analyse croisée.

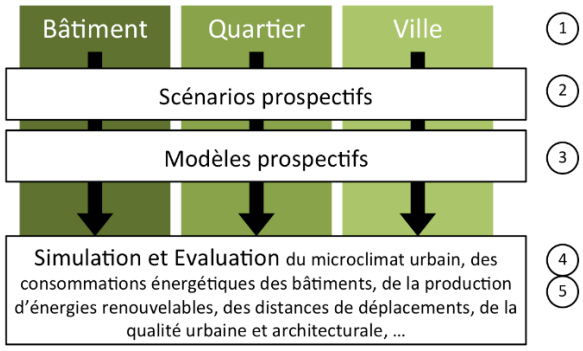


Figure : Méthode du projet

Principaux résultats

Ce projet a permis d'illustrer par des exemples concrets les leviers d'actions sur les interactions complexes entre ville, climat et énergie. Dans le contexte parisien, limiter l'étalement urbain, favoriser la compacité et la densité tout en végétalisant au maximum les espaces laissés libres semblent ainsi être des « solutions sans regret ».

Les scénarios de végétalisation en ville actuelle concernaient d'une part la mise en place généralisée de toits végétalisés sur tous les immeubles collectifs, de bureaux et industriels, et d'autre part la végétalisation des « espaces libres » en ville (c'est à dire ronds-points, trottoirs, parkings, places, ...) à divers taux : 0%, 25%, 50% et 75%.

Les résultats de simulation montrent que les toitures végétalisées n'ont soit aucun effet sur la température dans les rues au niveau des piétons, soit un effet faible mais non nul (au mieux de -0.5°C) quand elles sont arrosées ; cet aspect peut présenter une difficulté lors de périodes de canicule. L'augmentation de la couverture végétale au sol est plus efficace à rafraîchir les rues, avec un rafraîchissement d'autant plus élevé que le taux de végétalisation est important et que la proportion d'arbres est élevée.

Dans les simulations, les toitures végétalisées, contrairement à leur faible impact sur le confort thermique extérieur, apparaissent comme une des solutions les plus efficaces pour réduire la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation au cours de la canicule.

Quant à l'inverse, on augmente trop la couverture de végétation en ville, la réduction des surfaces artificialisées entraine une diminution du ruissellement annuel qui ne permet plus de couvrir les besoins en eau pour l'arrosage en été, suggérant que la ressource en eau devrait être trouvée ailleurs. Une autre hypothèse d'irrigation est la récupération des eaux grises des logements (eaux usées provenant des douches, lavabos et laves linges), qui permettrait, après une phase de traitement, de couvrir les besoins en eau pour l'irrigation.

Quelques publications réalisées au cours de ce projet

- Masson V. et al 2014: Adapting cities to climate change: a systemic modelling approach. Urban Climate, 10, 407-429.
- Viguié, V., S. Hallegatte, and J. Rozenberg. 2014. "Downscaling Long Term Socio-Economic Scenarios at City Scale: A Case Study on Paris." Technological Forecasting and Social Change.
- Lemonsu A., et al, 2012 : Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas, Geoscientific Model Development, 5, 1377-1393

Ressources / aller plus loin

Le site du projet : http://www.cnrm-game-meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique48

Les programmes et projets de recherche en cours

- **Le projet CAVIARS** : Agence Nationale de la Recherche (ANR)
- **Le projet LIFE-ADVICLIM** : LIFE multiannual work programme for 2014-2017
- **Le Méta-programme ACCAF** : Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA)
- **Le Programme MICCA** : Federal Ministry of Food and Agriculture of Germany, Ministry for foreign affairs of Finland et Norwegian Ministry of foreign affairs

PROJET DE RECHERCHE		
CAVIARS **CLIMAT, AGRICULTURE ET VEGETATION : IMPACTS SUR L'EROSION EOLIENNE AU SAHEL**	***Type***	*Projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) : Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés, 2012*
	Durée	*2013 - …(en cours)*
	Description succincte	*Projet de développement d'un un outil de modélisation intégré visant à décrire l'évolution de l'érosion éolienne au Sahel en liaison avec les modifications climatiques et d'usage des sols.*
	Axe de l'étude	*AXE 1 : Impacts des changements climatiques sur les sols*
	Principales thématiques	*Erosion éolienne*

Collaborateurs

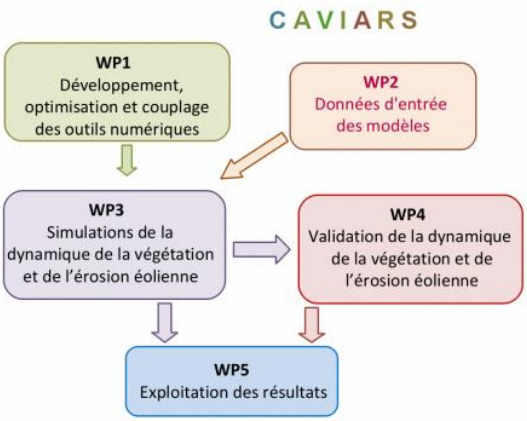
Noms	Pays
Coordinateur : Béatrice MARTICORENA, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA) LISA - Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA) CIRAD - Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement CNRM / GAME - Centre national de recherches météorologiques / Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique IEES - Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris GET - Géosciences environnement Toulouse LTHE - Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - UMR5564	France
JEAI ADE - Programme JEAI Anthropisation et Dynamique Eolienne (ADE)	Niger

Description du projet de recherche

Le projet CAVIARS se propose de quantifier l'impact relatif des conditions climatiques et de l'utilisation des sols dans l'évolution observée de l'érosion éolienne entre les années 1960 et 2000, par une approche de modélisation décrivant les liens entre les processus d'érosion éolienne, la dynamique de la végétation et des cultures et les paramètres météorologiques (vent et précipitations).

Il repose sur plusieurs modèles existants d'érosion éolienne des sols (DPM, LISA), de végétation sahélienne (STEP, GET) et de cultures (Sarra-H, CIRAD), combinés et optimisés au vu des objectifs affichés.

Les objectifs du projet sont multiples:



- Développement, optimisation et couplage d'outils de modélisation fiables permettant de quantifier les différents termes responsables des changements de l'intensité de l'érosion éolienne au Sahel (usage des sols, évolution de l'aridité…) au cours des 50 dernières années ;
- Mise en place d'un jeu d'observations de qualité, inscrites dans la durée des principaux indicateurs directs ou indirects de l'érosion éolienne (suivi des précipitations, évolution de la couverture végétale, contenu de l'atmosphère en poussières…) ;
- Validation basée sur la quantification de l'érosion éolienne à la fois mesurée localement sur des parcelles pâturées ou cultivées et à l'échelle régionale ou continentale (avec des proxis tels le contenu en poussières de l'atmosphère).

Principaux résultats

En décembre 2016, le projet délivrera :

- Un modèle couplé permettant de quantifier spatialement et temporellement la dynamique de la végétation naturelle et anthropique, l'érosion éolienne et les émissions d'aérosols minéraux en Afrique de l'Ouest en identifiant les composantes naturelles et anthropiques ;
- Une validation poussée de chacune de ces simulations et une évaluation de leur qualité pour la période récente (2000-2010) ;
- Une estimation des capacités du modèle élaboré à reproduire les conséquences (en termes de végétation, érosion éolienne et émission d'aérosols minéraux) des changements climatiques subis par le Sahel depuis 1960 ;
- Une analyse hiérarchisée des déterminants des évolutions observées au cours de cette période historique.

Cet outil, une fois testé dans des conditions climatiques et d'utilisation des sols contrastées, pourra être utilisé pour évaluer l'impact des changements climatiques à venir en intégrant des scénarii d'évolution de l'usage des sols, mais aussi pour certaines périodes clés du passé plus lointain.

Plusieurs perspectives ont été mises en évidence :

- Un nouveau partenariat pour l'évaluation de l'impact économique du climat des activités humaines sur l'érosion éolienne (Coll. Econometrix, Nanterre)
- Des collaborations avec des équipes américaines (P. Ginoux, NOAA/GFLD, New York; G. Okin, UCLA, Los Angeles) sur l'impact de la végétation naturelle et cultivée sur l'érosion éolienne
- Un outil de modélisation permettant de proposer des solutions préventives ou curatives de gestion de l'usage des sols
- Un outil de prévision de l'impact des changements climatiques et des activités humaines sur l'érosion éolienne dans les zones actuellement semi-arides et les futures zones semi-arides.
- La formation de jeunes chercheurs français et africains à des approches pluri et interdisciplinaires

Quelques publications réalisées au cours de ce projet

- Pierre, C., et coll., Modeling wind erosion flux and its seasonality from a cultivated sahelian surface: A case study in Niger, Catena, 122, 61-71, 2014.
- Pierre, C., et coll., Comparing drag partition schemes over an herbaceous Sahelian rangeland, J. Geophys. Res., 119, 2291- 2313, 2014.
- Largeron, Y., et coll., Can we use surface wind fields from meteorological reanalyses for Sahelian dust emission simulations ? Geophys. Res. Lett., 42, doi:10.1002/2014GL062938, 2015.

Ressources / aller plus loin

Le site du projet : http://caviars.lisa.u-pec.fr/

La synthèse : http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/documents/2015/posters/poster_CAVIARS.pdf

PROJET DE RECHERCHE		
LIFE-ADVICLIM **ADAPTATION OF VITICULTURE TO CLIMATE CHANGE**	***Type***	*Projet financé par LIFE multiannual work programme for 2014-2017*
	Durée	*2014 - … (en cours)*
	Description succincte	*Etudie des scenarii d'adaptation et d'atténuation, à l'échelle des terroirs viticoles, pour différents vignobles représentatifs de la diversité climatique des régions viticoles européennes*
	Axe de l'étude	*AXE 2 : Rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique*
	Principales thématiques	*Choix de nouvelles pratiques agricoles*

Collaborateurs

Noms

Partenaires

Coordinateur : Hervé Quénol, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et Université de Rennes 2, France

Université Rennes 2, France

Institut Français de la Vigne et du Vin (IFVV), France

Plumpton College, Grande-Bretagne

UMR6554LETG - Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France

Ecoclimasol, France

Hochschule Geisenheim University, Allemagne

UMR 1287 EGFV – Institut National de Recherche Agronomique (INRA) et Bordeaux Sciences Agro, France

UE1117 UVV - Institut National de Recherche Agronomique (INRA), France

Université des Sciences de l'Agriculture et de la Médecine Vétérinaire Iaşi (USAMV), Roumanie

Description du projet de recherche

Le projet LIFE-ADVICLIM (2014-2019) a pour objectif d'étudier des scénarii d'adaptation de la viticulture aux échelles locales pour différents vignobles européens représentatifs de la diversité climatique des régions viticoles européennes.

Ce projet s'appuie sur un réseau international d'observation et de modélisation aux échelles fines. Ce réseau a été mis en place par des équipes interdisciplinaires qui regroupe l'ensemble des équipes françaises travaillant sur l'impact du changement climatique sur la viticulture française.

Dans la continuité de ces travaux, l'objectif de la sous-action «Adaptation des pratiques culturales au changement climatique » a pour but le développement de stratégies d'adaptation à l'échelle des vignobles, reproductibles au niveau Européen, ainsi que la simulation de l'impact de la variabilité climatique sur la dynamique de la vigne et sur les stratégies de production de vin.

Les objectifs sont les suivants :

- spécifier un environnement systémique et une modélisation intégrée capable de simuler la croissance de la vigne et la maturation du raisin sous différentes conditions et contraintes (pente, aspect, type de sol, variabilité climatique…) et intégrer les stratégies de production ainsi que les règles d'adaptation correspondantes selon l'évolution de ces contraintes ;
- construire un modèle d'activités viticoles pour chaque site de démonstration.

Un modèle générique a été créé (les activités viticoles spécifiques d'un site), modèle qui inclut les stratégies de production (modélisation par arbre décisionnel), et qui reproduit l'impact de la variabilité spatiale (dont le sol et les caractéristiques géo-pédologiques) et temporelle des conditions climatiques sur la croissance de la vigne et la maturité du raisin.

Principaux résultats
Plusieurs résultats sont attendus : • Les modèles climatiques à l'échelle très locale dans des zones viticoles ; • Un logiciel pour aider les gestionnaires de la vigne à mesurer et réduire leurs émissions de CO_2 ; • La mise en œuvre des mesures d'atténuation et d'adaptation dans des sites pilotes, réalisant au moins une réduction de 20% des émissions de GES d'ici la fin du projet (au moins 67,5 tonnes d'équivalent CO_2 pour les six sites pilotes) ; • Un manuel des meilleures pratiques sur les mesures d'adaptation et d'atténuation pour les propriétaires de vignobles. Un réseau de propriétaires de vignobles et une plate-forme web de support pour l'information et l'échange.

Ressources / aller plus loin
Le site du projet : http://www.adviclim.eu/fr/

METAPROGRAMME DE RECHERCHE		
ACCAF **ADAPTATION DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORET AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**	***Type***	*Métaprogramme financé par l'INRA*
	Durée	*2011 -… (en cours)*
	Description succincte	*Le métaprogramme ACCAF travaille à comprendre les effets conjoints des différentes modifications globales provoquées par le changement climatique sur l'activité agricole et les milieux naturels terrestres, et à réfléchir aux stratégies d'adaptation ainsi qu'à leurs conséquences environnementales et socio-économiques.*
	Axe de l'étude	*AXE 1 : Impacts des changements climatiques sur les sols* *AXE 2 : Rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique*
	Principales thématiques	*Neige – approvisionnement en matières végétales*

Collaborateurs

Noms
Coordinateur : Thierry CAQUET, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), France
Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie Marine et Continentale (IMBE), France
Wageningen UR (WUR), Pays-Bas
Københavns Universitet, Danemark
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australie
Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (Cired), France
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE-CEA), France
Agence Nationale de la Recherche (ANR), France
Météo-France, France
University of Adelaide, Australie
International Livestock Research Institute & University of Edinburgh, Grande Bretagne
Joint Research Centre (JRC) Séville, Espagne
Imperial College London, Grande-Bretagne
Università della Tuscia, Viterbo, Italie
Universidad de Cordoba, Espagne
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), France

Description du programme de recherche

Le métaprogramme ACCAF mobilise des compétences scientifiques pluridisciplinaires autour de l'adaptation au changement climatique et a soutenu plus de 25 projets de recherche (échelle nationale et internationale) sur les cultures annuelles et pérennes, l'élevage, la forêt, la biodiversité ainsi que les ressources en eau et en sol.

Les 7 objectifs du métaprogramme ACCAF :

- Evaluer et gérer les risques et les opportunités à moyen terme associés à la variabilité du climat et définir des stratégies visant à anticiper et pallier les crises climatiques ;
- Projeter et scénariser (avec une quantification des incertitudes associées) les impacts régionaux du changement climatique sur l'agriculture et les écosystèmes plus ou moins anthropisés ;
- Comprendre et maîtriser les principaux effets du changement climatique sur la biodiversité, son évolution (aires de répartition des espèces, diversité génétique) ainsi que celle de la santé (espèces invasives, bio-agresseurs et leur diversité génétique, maladies) des écosystèmes, agro-systèmes et des bêtes de rente ;
- Améliorer génétiquement les espèces cultivées ou domestiquées et les animaux de rente aux modifications du climat et de ses conséquences (composition de l'atmosphère - CO_2, ozone, nouveaux bio-agresseurs, etc.) et renforcer la capacité d'adaptation des systèmes de culture, des systèmes de production et des filières ;

- Développer des technologies innovantes de l'adaptation compatibles avec la réduction des émissions et l'augmentation ou la pérennisation de la taille des puits de gaz à effet de serre ;
- Identifier les coûts et les bénéfices de mesures d'adaptation au regard de différents enjeux : compétitivité économique, biodiversité, ressources en eau et en sols, satisfaction des besoins alimentaires, qualité et sécurité sanitaire des produits ;
- Définir des modes d'organisation collective (gouvernance des territoires, assurances, formation, innovation, valorisation) susceptibles de renforcer la capacité d'adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique.

Le métaprogramme ACCAF se concentre sur 5 thématiques de recherche principales :

- Adaptation des ressources naturelles et des territoires ;
- Adaptation des productions végétales ;
- Adaptation des productions animales ;
- Adaptation et biodiversité ;
- Adaptation et santé animale et végétale.

Parmi l'ensemble des projets inclus dans le métaprogramme ACCAF, un seul traite, pour le moment, de la thématique sol: le projet A-WEST-CC.

Principaux résultats

ZOOM SUR LE PROJET A-WEST-CC (2012-2015)

Le Potentiel Agricole des Sols du Sud-Ouest Sibérien lié au Changement Climatique

Objectifs du projet :

Ce projet vise à évaluer les opportunités et les risques associés au développement de l'agriculture dans les plaines de Sibérie occidentale dans le contexte du changement climatique en cours. Il analyse comment la neige, limitant le gel des sols, va modifier les flux d'eau, la décomposition de la matière organique, le taux de libération des éléments nutritifs de la litière et finalement la fertilité des sols.

Ces changements biogéochimiques dans les sols couplés à une teneur en CO_2 croissante dans l'atmosphère, à des températures plus élevées et à des saisons de croissance plus longues, pourraient accroître la productivité primaire et permettre le développement de l'agriculture.

Résultats du projet :

Dans la région des montagnes du Salair, les travaux ont révélé de fortes teneurs en P total dans les sols et une grande disponibilité en P inorganique, s'accumulant dans les horizons profonds.

Les résultats sur le traçage du 15N semblent indiquer que la présence d'une couverture neigeuse, suffisamment épaisse pour empêcher le gel hivernal des sols, impacte le fonctionnement du système au printemps et non durant la période hivernale, comme initialement pressenti.

- Les sols n'ayant pas gelé durant l'hiver disposeraient d'une biomasse non dormante qui reprendrait très rapidement une activité lors de la fonte des neiges. Il est possible également que les sols n'ayant pas gelé permettent la lente production et l'accumulation d'enzymes. Ce stock d'enzymes permettrait la libération rapide de nutriments pour la biomasse se développant au printemps.
- Dans les sols ayant gelé, la reprise d'activité des microorganismes en dormance serait beaucoup plus lente.

Ressources / aller plus loin

Le site du programme : http://www.accaf.inra.fr

PROGRAMME DE RECHERCHE		
MICCA **MITIGATION OF CLIMATE CHANGE IN AGRICULTURE**	***Type***	*Programme financé par Federal Ministry of Food and Agriculture, Ministry for foreign affairs of Finland et Norwegian Ministry of foreign affairs*
	Durée	*2010 -… (en cours)*
	Description succincte	*Le Programme MICCA vise à améliorer les moyens de subsistance des agriculteurs dans les pays en développement et à permettre à ces agriculteurs de contribuer à atténuer le changement climatique*
	Axe de l'étude	*AXE 2 : Rôle des sols dans l'adaptation au changement climatique*
	Principales thématiques	*Changement climatique – stockage du carbone – tourbières et sols organiques*

Collaborateurs

Noms
Coordinateur : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture - FAO
Association de solidarité Internationale - Care
Consortium of International Agricultural Research Centers (CGIAR)
Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)
Heifer International
International Livestock Research Institute (ILRI), Ethiopie & Kenya
LFL Agrarökonomie, Allemagne
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Allemagne
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
World Agroforestry Centre (ICRAF), Kenya
United Nations Development Programme (UNDP) - Low Emission Capacity Building Programme ; United Nations Framework Convention on Climate Change ; United Nations Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (UN-REDD)
NAMA Partnership
IFAD Investing in rural people, Italie
Thünen institute of farm economics, Allemagne
Agri benchmark
ASIA LEDS Partnership, Thaïlande
University of Idaho, Etats-Unis
World Bank Group
Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Allemagne
International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)
International Union for Conservation of Nature (IUCN)
International Partnership on Mitigation and MRV
Michael Succow Foundation for the Protection of Nature, Allemagne
University of Helsinki, Finlande
Wetlands International, Pays-Bas
Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries, United Republic of Tanzania, Tanzanie ; Ministry of Agriculture, Livestock and Fishery of Kenya (MALF), Kenya ; Ministry of Agriculture and Rural Development of Vietnam (MARD),Vietnam

Description du programme de recherche

Le programme MICCA a pour mission de traiter la question des changements climatiques dans les secteurs de l'agriculture, des forêts et des pêches et de contribuer au développement de l'offre de la FAO de soutien aux pays qui participent aux négociations sur les changements climatiques dans le cadre de la Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

Les objectifs du programme MICCA sont de :

- contrôler et mesurer les émissions de GES et la possibilité d'en atténuer les effets dans le secteur agricole ;
- développer les compétences des parties prenantes pour leur permettre de travailler sur des inventaires nationaux de GES dans le secteur agricole en utilisant les pratiques mises en œuvre dans le cadre d'une agriculture intelligente face au climat ;
- effectuer des études du cycle de vie dans le secteur de l'élevage afin d'aider les prises de décision ;
- fournir des conseils sur différentes options possibles concernant l'atténuation des changements climatiques, et l'adaptation à celui-ci, pour les tourbières et les sols organiques ;
- intégrer les questions de parité homme-femme dans le cadre d'une agriculture intelligente face au climat ;
- créer des communautés de pratique en ligne et dispenser des formations en ligne.

Le Programme MICA développe plusieurs grandes thématiques :

- **Estimation des émissions dans le secteur AFOLU** : enrichissement des connaissances sur les sources les plus importantes des GES dans le secteur de l'agriculture, la foresterie et autre utilisation des terres (AFOLU) et permet de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de ces émissions ;
- **Tourbières et sols organiques** : Le programme MICCA fournit des connaissances et des informations et aide à prendre conscience des services écosystémiques des tourbières et des conséquences du drainage ;
- **Parité homme-femme** : Le programme MICCA s'occupe tout particulièrement des questions de la parité homme-femme dans le cadre d'une agriculture intelligente face au changement climatique.

Parmi ce que finance le programme MICCA, une initiative, conjointe avec Wetlands International, concerne plus particulièrement la thématique sol : l'initiative sur les sols organiques et les tourbières et l'atténuation du changement climatique.

Principaux constats

L'agriculture peut profiter des synergies créées entre adaptation au changement climatique et son atténuation dans les conditions propices. Le secteur agricole possède le potentiel nécessaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) mais c'est aussi le seul qui est capable d'éliminer les GES de l'atmosphère de manière efficace sans entraîner une baisse de productivité.

Des données fiables et de solides accords institutionnels peuvent permettre de mieux définir différentes options d'atténuation des changements climatiques, efficaces et viables, dans les secteurs de l'agriculture et de l'utilisation des sols. Une meilleure gestion des tourbières peut par exemple permettre de réduire les émissions de GES, de maintenir les services écosystémiques et d'aider les communautés à s'adapter aux changements climatiques.

Zoom sur l'initiative sur les sols organiques et les tourbières et l'atténuation du changement climatique :

Cette initiative globale portant sur les sols organiques et tourbières et atténuation du changement climatique, constitue un réseau informel d'organisations (Wetlands International, Université de Greifswald, UICN, etc.) et de personnes engagées à réduire les émissions de tourbières et à sauvegarder les services écosystémiques vitaux rendus par les tourbières. Elle a permis de faire émerger plusieurs constats :

- Les tourbières et les sols organiques ne couvrent que 3% de la superficie de la Terre mais contiennent 30% du carbone total des sols ;
- Les émissions de CO_2 des tourbières drainées s'élèvent au niveau mondial à près de 2 gigatonnes par an et représentent actuellement près de 25% des émissions de CO_2 du secteur de l'utilisation des terres, de leur changement d'affectation et de la foresterie ;
- La moitié des émissions mondiales dues à la dégradation des tourbières proviennent de l'Asie du Sud-Est où les taux de déforestation et de drainage sont élevés ;
- Après l'Indonésie, l'Union européenne est le deuxième plus grand émetteur mondial de gaz à effet de serre provenant des tourbières. Dans les 27 pays de l'Union européenne, la culture et le pâturage sur sols organiques

sont responsables de presque 80% des émissions de CO_2 provenant de toutes les terres consacrées à l'agriculture.

Quelques publications réalisées au cours de ce programme

- Outil d'apprentissage sur les mesures d'atténuation appropriées au niveau national (MAAN) dans le secteur de l'agriculture, la foresterie et des autres affectations des terres (AFAT) – 2015
- Estimations des émissions de gaz à effet de serre en agriculture - Un manuel pour répondre aux exigences de données des pays en développement – 2015
- Émissions par sources et absorptions par puits issues de l'agriculture, la foresterie et des autres utilisations des terres– 2014

Ressources / aller plus loin

Le site du programme : http://www.fao.org/in-action/micca/fr/

La page internet de l'initiative sur les sols organiques et les tourbières et l'atténuation du changement climatique : http://www.fao.org/climatechange/micca/peat/fr/

Références bibliographiques

[1] Antoni, V. et al., 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols. Chromatiques Editions. 188p

[2] Houle, D. et al., 2014. Développement d'indicateurs hydro-climatiques : prédiction de la température et de l'humidité des sols forestiers et de leurs impacts potentiels sur la fertilité des sols. Programme ICAR-Québec. 104p

[3] Tobin, D. et al., 2015. Northeast and Northern Forests Regional Climate Hub Assessment of Climate Change Vulnerability and Adaptation and Mitigation Strategies. 65p

[4] Hernandez, L., 2015. Soils and a changing climate. 23p

[5] Nearing, et al., 2004. Expected Climate Change Impacts on Soil Erosion Rates: A Review. Journal of Soil and Water Conservation, 59 Number 1. 43-50

[6] Antoni, V., 2015. Sols et environnement : Chiffres clés. 108p

[7] Morel et al., 2015. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMAs). Journal of Soils and Sediments, Volume 15, Issue 8. 1659-1666

[8] Mehdi, B. et al., 2015. Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies. Agriculture, Ecosystems and Management, Volume 213. 47-60

[9] Wani, S.A. et al., 2013. Organic Farming: As a Climate Change Adaptation and Mitigation Strategy. Current Agriculture Research Journal, Volume 1. 45-50

[10] NSW Government, 2011. New South Wales Climate Impact Profile. Technical Report. Potential impacts of climate change on soils. Office of Environment and Heritage, Department of Premier and Cabinet . 94p

[11] Gombault, C. et al., 2015. Modelling climate change impacts on the hydrology of an agricultural watershed in southern Québec. Canadian Water Resources Journal, Volume 40, Issue 1. 71-86

[12] Spiegel, H. et al., 2014. Impacts of soil management on indicators for climate change mitigation. CATCH-C project . 57p

[13] Pachauri, R et al., 2008. Changements Climatiques 2007. Rapport du GIEC. 114p

[14] Germon, J.C., 1998. Le rôle régulateur du sol dans le changement climatique. Courrier de l'environnement de l'INRA n°35. 8p

[15] Soubeyroux, J.M. et al., 2011. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Projet ClimSec. 72p

[16] Ceren Onur et al., 2015. Ecosystem services based spatial planning decision making for adaptation a to climate changes. Habitat international Volume 47. 267–278

[17] FNE, 2009. Les sols: l'allié méconnu de l'Europe dans la lutte contre le changement climatique. France Nature Environnement. 16p

[18] Rankovic, A. et al., 2012. Services écosystémiques et adaptation urbaine interscalaire au changement climatique: un essai d'articulation. VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Hors-série 12.

[19] Chen, W Y., 2015. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: A nationwide estimate. Cities, Volume 44. 112–120

[20] Goebel, M.O. et al., 2011. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events?. Global Change Biology, 17. 2640-2656

[21] Burri, S. et al., 2013. The impact of extreme summer drought on the short-term carbon coupling of photosynthesis to soil CO2efflux in a temperate grassland. Biogeosciences Discuss, 10. 11671-11704

[22] Cortrufo, M.F. et al., 2011. Decreased summer drought affects plant productivity and soil carbon dynamics in a Mediterranean woodland. Biogeoresources, 8. 2729-2739

[23] Jones, A. et al., 2009. Climate change in Europe. 2. Impact on soil. A review. Agronomy for Sustainable Development, 29, 3. 423-432

[24] Allison, S.D. et al., 2010. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology. Nature geosciennce, 3. 336-340

[25] Allen, D.E. et al., 2011. Soil Health and Climate Change. Chapter 2 - Soil health indicators under climate change: A review of current knowledge. Soil Biology, 29. 25-45

[26] Bhattacharyya, P. et al., 2013. Impact of elevated CO2 and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH4 and N2O emissions from tropical flooded rice (Oryza sativa L.). Science of the Total Environment, 461-462. 601-611

[27] Cheng, L. et al., 2011. Soil Microbial Responses to Elevated CO2 and O3 in a Nitrogen-Aggrading Agroecosystem. PLoS ONE, 6, 6. 1-11

[28] Carney, K.M. et al., 2007. Altered soil microbial community at elevated CO2 leads to loss of soil carbon. PNAS, 104, 12. 4990-4995
[29] Butler, S.M. et al., 2011. Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: implications for ecosystem function and structure. Oecologia. 10p
[30] Brown, J.R. et al., 2011. Effects of multiple global change treatments on soil N2O fluxes. Biogeochemistry. 16p
[31] Brevik, E.C., 2013. The Potential Impact of Climate Change on Soil Properties and Processes and Corresponding Influence on Food Security. Agriculture, 3. 398-417
[32] Office of Environment and Heritage, 2011. New South Wales Climate Impact Profile Technical Report - Potential impacts of climate change on soils. State of NSW. 94p
[33] Van Groenigen et al., 2014. Faster Decomposition Under Increased Atmospheric CO2 Limits Soil Carbon Storage. Science, 344. 508-509
[34] De Paz et al., 2012. Prediction of the effects of climate change on the soil salinity of an irrigated area under Mediterranean conditions. Instituto valenciano de investigaciones agrarias, Centro para el desarrollo de la agricultura sostenible. 1p
[35] Desbourdes, L. et al., 2008. Effets des changements climatiques sur l'évolution des stocks de carbone organique des sols forestiers. . 9p
[36] Niboyet, A. et al., 2011. Global Change Could Amplify Fire Effects on Soil Greenhouse Gas Emissions. PLoS ONE, 6, 6. 1-10
[37] Knohl, A. et al., 2011. Indirect feedbacks to rising CO2. Nature, 475. 177-178
[38] Zhou, X. et al., 2013. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland. Science of the Total Environment, 444. 552-558
[39] Varallyay, G., 2010. The impact of climate change on soils and on their water management. Agronomy Research, 8. 385-396
[40] Van Groenigen et al., 2011. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO2. Nature, 475. 214-216
[41] Schoups, G. et al. Climate change impacts on water demand and salinity in California's irrigated agriculture. 38p
[42] Reinds, G.J. et al., 2009. Modelling recovery from soil acidification in European forests under climate change. Science of the Total Environment, 407. 5663-5673
[43] Prescott, C., 2008. Heat-proof carbon compound. Nature geosciennce, 1. 815-816
[44] Oren, R. et al., 2001. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO2-enriched atmosphere. Nature, 411. 469-471
[45] Qafoku, N.P., 2014. Overview of different aspects of climate change effects on soils. U.S. Department of Energy. 52p
[46] Tang, C.S. et al., 2011. Urbanization effect on soil temperature in Nanjing, China. Energy and Buildings, 43. 3090-3098
[47] Clark, C., 2010. Quantifying Thermal Impacts of Green Infrastructure: Review and Gaps. Cities of the future/Urban river restoration. 69-77
[48] Giguere, M., 2009. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Institut national de santé publique du Québec. 95p
[49] Gill, S.E. et al., 2007. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. Built Environment, 33, 1. 115-133
[50] Ouldboukhitine, S.E. et al., 2012. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. Building and Enviroment, 56. 78-85
[51] Qafoku, N.P., 2015. Climate-Change Effects on Soils: Accelerated Weathering, Soil Carbon, and Elemental Cycling. Advance in agronomy, 131. 111-172
[52] Bertermann, D. et al., 2015. A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy potentials. Renewable Energy, 75. 335-347
[53] ONERC, 2015. Sols et sécheresse.Le climat change agissons ! La lettre aux élus 23. 4p
[54] Esteve, P. et al., 2015. A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics, 120. 49-58
[55] Hong, E.M. et al., 2016. Projected irrigation requirements for upland crops using soil moisture model under climate change in South Korea. Agricultural water management, 165. 163-180
[56] Bird, D.N. et al., 2016. Modelling climate change impacts on and adaptation strategies for agriculture in Sardinia and Tunisia using AquaCrop and value-at-risk. Science of the total environment, 543, B. 1019-1027
[57] Barona, C.O., 2015. Adopting public values and climate change adaptation strategies in urban forest management: A review and analysis of the relevant literature. Journal of Environment Management, 164. 215-221

[58] Geneletti, D. et al., 2016. Ecosystem-based adaptation in cities: An analysis of European urban climate adaptation plans. Land Use Policy, 50. 38-47
[59] Mitter, H. et al., 2015. Spatial modeling of robust crop production portfolios to assess agricultural vulnerability and adaptation to climate change. Land Use Policy, 46. 75-90
[60] Li, S. et al., 2015. Farmers' initiative on adaptation to climate change in the Northern Agro-pastoral Ecotone. International Journal of disaster risk reduction, 12. 278-284
[61] Iglesias, A. et al., 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. Agricultural water management, 155. 113-124
[62] Ehlers, L. et al., 2016. Sensitivity of mGROWA-simulated groundwater recharge to changes in soil and land use parameters in a Mediterranean environment and conclusions in view of ensemble-based climate impact simulations. Science of the total environment, 543, B. 937-951
[63] Lefebvre, G. et al., 2015. Contribution of rainfall vs. water management to Mediterranean wetland hydrology: Development of an interactive simulation tool to foster adaptation to climate variability. Environmental Modelling & Software, 74. 39-47
[64] Spencer, T. et al., 2016. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: The DIVA Wetland Change Model. Global and Planetary Change.
[65] Bormann, H., 2012. Assessing the soil texture-specific sensitivity of simulated soil moisture to projected climate change by SVAT modelling.Geoderma, 185-186. 73-83
[66] Holsten, A. et al., 2009. Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas. Ecological Modelling, 220, 17. 2076-2087
[67] Touhami, I. et al., 2015. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. Journal of Hydrology, 527. 619-629
[68] Paroissien, J.B. et al., 2015. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). Journal of environmental Management, 150. 57-68
[69] Nerantzaki, S.D. et al., 2015. Modeling suspended sediment transport and assessing the impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed. Science of the total environment, 538. 288-297
[70] Daou, L. et al., 2016. Effects of drying–rewetting or freezing–thawing cycles on enzymatic activities of different Mediterranean soils. Soil Biology and Biochemistry, 93. 142-149
[71] Aguilera, E. et al., 2013. Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 168. 25-36
[72] Von Gunten et al., 2015. Estimating climate-change effects on a Mediterranean catchment under various irrigation conditions. Journal of Hydrology: Regional Studies, 4, B. 550-570
[73] Nunes, J.P. et al., 2013. Modeling the response of within-storm runoff and erosion dynamics to climate change in two Mediterranean watersheds: A multi-model, multi-scale approach to scenario design and analysis. CATENA, 102. 27-39
[74] Simmoneaux, V. et al., 2015. Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco). Journal of arid Environments, 122. 64-75
[75] Francaviglia, R. et al., 2012. Changes in soil organic carbon and climate change – Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. Agricultural systems, 112. 48-54
[76] Yuste, J.C. et al., 2014. Strong functional stability of soil microbial communities under semiarid Mediterranean conditions and subjected to long-term shifts in baseline precipitation. Soil Biology and Biochemistry, 69. 223-233
[77] Bonfante, A. et al., 2015. The role of soil series in quantitative land evaluation when expressing effects of climate change and crop breeding on future land use. Geoderma, 259-260. 187-195
[78] Erban, L.E. et al., 2015. Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. Environmental Research Letters, 9. 1-6
[79] Dahiya, R. et al., 2007. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling. Soil & Tillage Research, 96. 52-63
[80] Gregory, A.S. et al., 2009. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. Geoderma, 153. 172-185
[81] Sarkar, S. et al., 2007. Interactive effect of tillage depth and mulch on soil temperature, productivity and water use pattern of rainfed barley (Hordium vulgare L.). Soil & Tillage Research, 92. 79-86
[82] Huang, Y. et al., 2005. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects. Agricultural Water Management, 72. 209-222
[83] Cook, H.F. et al., 2006. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under Zea mays L.. Soil & Tillage Research, 91. 227-235

[84] Bescansa, P. et al., 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. Soil & Tillage Research, 87. 19-27
[85] Zhang, S. et al., 2009. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China. Soil & Tillage Research, 102. 78-86
[86] Garcia-Orenes, F. et al., 2009. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil–water losses in eastern Spain. Soil & Tillage Research, 106. 117-123
[87] Wang, H. et al., 2001. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain - measurements and modelling. Agricultural Water Management, 48. 151-167
[88] Jordan, A. et al., 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. Catena, 81. 77-85
[89] Liu, Y. et al., 2013. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China. Soil & Tillage Research, 130. 7-12
[90] Ramakrishna, A. et al., 2006. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. Field Crops Research, 95. 115-125
[91] Chakraborty, D. et al., 2008. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (Triticum aestivum L.) in a semi-arid environment. Agricultural water management, 95. 1323-1334
[92] Wasige, J.E. et al., 2014. Contemporary land use/land cover types determine soil organic carbon stocks in south-west Rwanda. Nutr Cycl Agroecosyst, 100. 19-33
[93] Mellouli, H.J. et al., 2000. Evaporation losses from bare soils as influenced by cultivation techniques in semi-arid regions. Agricultural Water Management, 42. 355-369
[94] Verhulst, N. et al., 2011. Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. Plant Soil, 344. 73-85
[95] Heve W.K. et al., 2016. Targeted management of organic resources for sustainably increasing soil organic carbon: Observations and perspectives for resource use and climate adaptations in northern Ghana. Soil & Plant Science, 66, 2. 178-190
[96] Clermont-Dauphin C. et al., 2016. Dinitrogen fixation by the legume cover crop Pueraria phaseoloides and transfer of fixed N to Hevea brasiliensis-Impact on tree growth and vulnerability to drought. Agriculture, Ecosystems & Environment, 217. 79-88
[97] Campos-Herrera R. et al., 2016. Entomopathogenic nematode food web assemblages in Florida natural areas. Soil & Biochemistry, 93. 105-114
[98] Hossain K. et al., 2016. Climate change-perceived impacts on agriculture, vulnerability and response strategies for improving adaptation practice in developing countries (South asian region). International Journal of Agricultural Research, 11. 01-12
[99] Jusselme M.-D. et al., 2016. Variations in snow depth modify N-related soil microbial abundances and functioning during winter in subalpine grassland. Soil Biology and Biochemistry, 92. 27-37
[100] Ferry, B. et al., 2014. Matières organiques des sols forestiers et changements climatique et atmosphérique. Revue forestière française, 4. 33-43
[101] Davidson, E.A. et al., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 440. 165-173
[102] Lal, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science, 304, 5677. 1623-1627
[103] Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 123,1-2. 1-22
[104] Rustad, L.E. et al., 2000. Controls on Soil Respiration: Implications for Climate Change. Biogeochemistry, 48, 1. 1-6
[105] Porporato, A. et al., 2004. Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. The American Naturalist, 164, 5. 625-632
[106] Parton, W.J. et al., 1995. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. Global Change Biology, 1, 1. 13-22
[107] Liu, W. et al., 2008. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. Global Change Biology, 15, 1. 184-195
[108] Jones,C., McConnell et al., 2004. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. Global Change Biology, 11, 1. 154-166
[109] Castro, H.F. et al., 2010. Soil Microbial Community Responses to Multiple Experimental Climate Change Drivers. Applied and Environmental Microbiology, 76,4. 999-1007
[110] Powlson, D.S. et al., 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. European Journal of Soil Science, 62, 1. 42-55
[111] Kardol, P. et al., 2010. Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects. Ecology, 91, 3. 767-781
[112] Suseela, V. et al., 2012. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment. Global Change Biology, 18, 1. 336-348

[113] Pritchard, S.G., 2011. Soil organisms and global climate change. Plant Pathology, 60. 82-89
[114] Kardol, P. et al., 2011. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. Applied Soil Ecology, 47, 1. 37-44
[115] Lal, R., 2010. Beyond Copenhagen: mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration. Food Security, 2, 2. 169-177
[116] Schindlbacher, A. et al., 2012. Soil respiration under climate change: prolonged summer drought offsets soil warming effects. Global Change Biology, 18,7. 2270-2279
[117] Fridley, J.D. et al., 2011. Soil heterogeneity buffers community response to climate change in species-rich grassland. Global Change Biology, 17, 5. 2002-2011
[118] Bardgett, R.D. et al., 2013. Hierarchical responses of plant–soil interactions to climate change: consequences for the global carbon cycle. Journal of Ecology, 101, 2. 334-343
[119] Evans, E. et al., 2014. Climate change alters ecological strategies of soil bacteria. Ecology letters, 17, 2. 155-164
[120] Kurylyk, B. et al., 2014. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. Earth-Science Reviews, 138. 313-334
[121] Viscarra Rossel et al., 2014. Baseline map of organic carbon in Australian soil to support national carbon accounting and monitoring under climate change. Global Change Biology, 20, 9. 2953-2970
[122] Sommer, R. et al., 2014. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. Journal of Environmental Management, 144. 83-87
[123] Jungqvist, G. et al., 2014. Effect of Climate Change on Soil Temperature in Swedish Boreal Forests. PLoS ONE, 9, 4.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

https://www.ademe.fr/

LES COLLECTIONS
DE L'ADEME

ILS L'ONT FAIT
L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES
L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.

FAITS ET CHIFFRES
L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR
L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation

HORIZONS
L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

EXPERTISES

SOLS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE : IMPACTS ET ADAPTATION

Résumé :
Le sol constitue une formation superficielle issue de l'altération de la roche sous-jacente, par l'action du climat et des organismes vivants. Il se situe à l'interface des compartiments environnementaux que sont l'atmosphère, la biosphère et les eaux et représente donc un milieu d'échanges indispensable à la régulation des cycles planétaires (eau, carbone, azote). Le changement climatique a un impact très important sur les sols, notamment sur les flux de matière organique et les différents processus à l'œuvre dans ce milieu. Les sols ont par ailleurs un rôle majeur à jouer dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, par exemple en tant que réservoirs d'eau ou en tant que support pour la végétation des espaces verts avec lesquels ils participent à lutter contre les îlots de chaleur urbains. Enfin, le sol est de manière générale un milieu peu étudié en tant qu'élément du système climatique.

Cette étude dresser l'état des lieux de la recherche sur le rôle du sol dans l'adaptation au changement climatique, et les impacts du changement climatique sur les sols, leurs fonctions écologiques et les services écosystémiques qu'ils rendent.

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

www.ademe.fr