



**HAL**  
open science

## Sols contaminés, carbone organique des sols et dérèglement climatique : quelles relations ?

Isabelle Lamy, Laura Sereni, Bertrand Guenet

### ► To cite this version:

Isabelle Lamy, Laura Sereni, Bertrand Guenet. Sols contaminés, carbone organique des sols et dérèglement climatique : quelles relations ?. Les sols contaminés sont ils cultivables ?, 2020. hal-03221136

**HAL Id: hal-03221136**

**<https://hal.science/hal-03221136>**

Submitted on 7 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Chapitre 2 : Sols contaminés, carbone organique des sols et dérèglement climatique : quelles relations ?

Isabelle LAMY<sup>1</sup>· Laura SERENI<sup>1</sup> & Bertrand GUENET<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 78026, Versailles, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Géologie, UMR 8538, Ecole Normale Supérieure, PSL Research University, CNRS, Paris, France

## 1 Introduction

Les sols sont le plus important stock de carbone organique à la surface de la Terre avec environ 1 500 Gt de carbone, ce qui représente environ deux fois plus de carbone que dans l'atmosphère (Derrien *et al.*, 2016). Des changements dans la dynamique du carbone, même mineurs, pourraient avoir un impact majeur sur le climat. C'est dans ce contexte qu'a récemment été lancé, sur une proposition de chercheurs de l'INRAE, le programme 4 pour mille, qui vise à augmenter les stocks de carbone des sols de 4 ‰ par an et ceci, dans le but de piéger des gaz à effet de serre. Pour ce faire, de nombreuses initiatives ont été lancées concernant des sols fertiles, cultivés, mais peu d'études concernent ceux qui sont moins fertiles et délaissés par l'agriculture. Ces sols souvent abandonnés à cause de leur faible productivité, ou de leur mauvaise qualité physico-chimique incluant de potentielles contaminations sont regroupés sous le vocable de « sols marginaux » (Kang *et al.*, 2013). Cependant, devant le manque croissant de surfaces agricoles fertiles, les moyens de valoriser les sols marginaux sont de plus en plus étudiés notamment pour les cultures de type non-alimentaire permettant ainsi d'éviter les concurrences entre surfaces agricoles. Parmi ces sols marginaux, qui incluent des sols urbains ou péri-urbains, ceux qui présentent une contamination même faible sont aussi à risque pour la qualité des écosystèmes lors de leur mise en culture. À ce titre, ils méritent une attention particulière.

Pour ces sols faiblement contaminés, deux grands défis scientifiques perdurent. Le premier concerne l'impact de la pollution des sols sur leurs capacités de stockage du carbone. Cet impact n'est pas pris en compte dans les modèles du cycle du carbone ni de prévisions du climat, malgré des surfaces agricoles dont la contamination devient avérée. Le deuxième concerne le fait que les sols ont un rôle de source et de puits de polluants, et dans un contexte de dérèglement climatique le devenir et les effets des polluants dans les sols restent encore peu documentés. Des facteurs, tels que les variations de température ou des changements dans les taux de précipitation, peuvent agir directement sur les processus biotiques et abiotiques dans les sols, modifiant ainsi leur fonctionnement. Les sols contaminés sont donc au centre de deux boucles de rétroactions avec le climat : l'une concerne les émissions de gaz à effet de serre de ces sols ; l'autre, le devenir des contaminants sous un climat modifié (figure 1). Or ces deux rétroactions sont encore trop pauvrement renseignées.

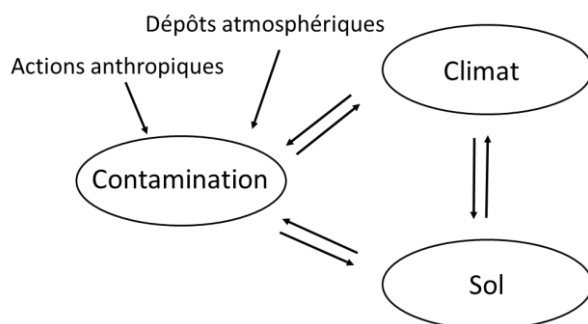


Figure 1. Interactions sol, climat, et contamination : la contamination du sol impacte son fonctionnement ce qui peut augmenter ou diminuer ses émissions de gaz à effet de serre. Ces modifications entraînent des variations du climat (T °C, précipitations, etc.) qui peuvent à leur tour impacter les processus ayant lieu dans le sol ou les dynamiques de contamination.

## 2 Éléments de contexte

Depuis maintenant plusieurs décennies, les climatologues du monde entier s'accordent sur l'existence d'un dérèglement climatique dont les causes principales sont les activités humaines (IPCC, 2007, 2013, 2018). Le facteur le plus important est l'utilisation d'énergies fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz qui donne lieu, lors de leur combustion, à des émissions de gaz à effet de serre : dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), protoxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), etc. L'effet de serre est un phénomène naturel sans lequel la vie sur Terre serait

impossible. Il permet de maintenir sur notre planète une température propice pour le développement de la vie. Une partie du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est piégée par notre atmosphère et cette énergie permet de maintenir une température moyenne globale de l'ordre de 15 °C. Mais l'activité humaine a pour conséquence de modifier la composition de l'atmosphère et d'augmenter l'effet de serre, et donc d'augmenter la température à la surface de notre planète. L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère a d'autres conséquences, notamment une modification des régimes de précipitations (fréquence et quantité de pluie comme de neige) ce qui peut avoir des répercussions majeures sur les écosystèmes naturels et nos sociétés modernes.

Suivant les scénarios de changement du climat, des augmentations de température de 1 à 5 °C à l'échelle globale seraient prévues pour la période 2081-2100 par comparaison avec la période 1986-2005 et ceci, avec une augmentation plus forte sur les zones émergées. Pour les précipitations, les incertitudes sont encore plus grandes, certains modèles prévoyant une diminution et d'autres modèles plutôt une augmentation des précipitations, avec une grande variabilité spatiale. Les effets du dérèglement climatique sur les sols sont généralement étudiés au travers d'une modification de variables telles que la température ou l'humidité mais plus rarement une combinaison des deux. Prédire la dynamique et l'écotoxicité de contaminants dans un environnement changeant reste un défi en raison de la multiplicité des impacts possibles. En effet, pour un contaminant donné, sa toxicité et sa biodisponibilité dépendront de la forme (en solution, sous forme solide, précipité, adsorbé, etc.) sous laquelle il se trouve, cette forme étant elle-même sous la dépendance de processus thermodynamiques régis par la température. De plus, les mécanismes de diffusion d'un contaminant vers la solution du sol, ou plus généralement les flux de contaminants, dépendent de l'état d'humidité du sol. Finalement, les micro-organismes peuvent décomposer la matière organique (à laquelle est lié le contaminant) ou le contaminant organique lui-même, mais leurs activités propres vont dépendre de la température et de l'humidité (Mougin *et al.*, 2015).

Par ailleurs, si les matières organiques sont à la fois substrat de nourriture pour les organismes du sol elles peuvent également retenir et se lier avec différentes substances telles que les contaminants. Il s'ensuit des résultats complexes à interpréter dans la littérature, suivant que les matières organiques auront un rôle protecteur vis-à-vis de la toxicité due aux contaminations, ou que les contaminations impacteront de façon négative le cycle des éléments nutritifs. Dans un contexte de dérèglement climatique et d'atténuation possible de ses effets en augmentant les stocks de carbone des sols, une des clés de compréhension consistera à prendre en compte les effets des contaminations des sols sur leurs capacités de stockage du carbone, mais aussi les effets de la présence de cette matière organique sur la toxicité des milieux.

Outre des travaux sur le devenir et l'effet des polluants sur les organismes dans les écosystèmes, une des sorties attendues de l'écotoxicologie est la définition de seuils de dangers et de risque qui permettent de faire un lien entre la connaissance scientifique, les acteurs et la réglementation. Pourtant, définir des seuils en écotoxicologie reste complexe, car l'action des polluants dans l'environnement se situe non seulement à différentes échelles spatio-temporelles mais aussi à différentes échelles biologiques : depuis l'échelle moléculaire affectant les individus, en passant par les effets sur les populations et les communautés jusqu'à l'effet sur les écosystèmes. En conséquence, il reste de nombreuses incertitudes sur la dynamique des contaminants dans les écosystèmes en contexte de changement global, ainsi que sur l'évolution de leur toxicité. Ces incertitudes sont ainsi un trou de connaissance dans la définition des seuils d'impact, alors que ces seuils sont un concept nécessaire en écotoxicologie. D'autre part, pour prédire les scénarios de climat futur, ces incertitudes sont également importantes à réduire. Ainsi, on ne sait pas si les seuils écotoxicologiques déterminés dans le contexte climatique actuel peuvent, ou non, être transférables à un climat correspondant au climat futur. Il conviendra de déterminer, si ce que l'on considère comme acceptable de nos jours, parce qu'en dessous de seuils d'alarme, pourrait devenir problématique dans le futur en raison des changements climatiques.

### 3 Des effets potentiellement nombreux et variés sur les organismes des sols dans les sols contaminés

Les écosystèmes faiblement contaminés, mais de façon chronique, sont désormais les cas les plus fréquemment rencontrés. La contamination des sols concerne des composés organiques comme les hydrocarbures, les pesticides ou encore les antibiotiques, ainsi que des composés minéraux comme les éléments trace (plomb, cadmium, mercure, cuivre, etc.). Ces contaminants sont apportés sur les sols par des dépôts atmosphériques, ou ajoutés au sol au travers de diverses pratiques agricoles telles que les épandages de composts ou de boues de station d'épuration ou encore les apports d'engrais (comme les phosphates riches en cadmium). Concernant les éléments trace, et au contraire des contaminants organiques, il faut prendre en compte le fait qu'ils sont déjà naturellement présents dans les sols. C'est ce qu'on appelle le « fond pédogéochimique » qui résulte de la formation du sol à partir de la désagrégation d'une roche mère qui contenait ces éléments à des teneurs variables suivant sa nature. Les activités humaines participent à disperser ces éléments minéraux qui ne sont pas biodégradables et s'accumulent donc dans les sols. Tous ces contaminants ont des impacts complexes sur le fonctionnement des

écosystèmes, à la fois sur les producteurs primaires comme les plantes mais également sur les animaux qui vivent dans ces écosystèmes. Par exemple, le cuivre est un oligo-élément, donc indispensable à la vie des organismes, mais qui peut être toxique à fortes doses<sup>1</sup> (Wuana et Okieimen, 2011). Il est cependant encore utilisé par l'homme pour ses propriétés fongicides en protection des plantes. Il peut aussi avoir un effet inhibant sur certaines enzymes essentielles au fonctionnement des plantes (Fernandez et Henriques, 1991) et donc devenir toxique également pour la plante. De plus, le cuivre a des effets toxiques sur les animaux et notamment les micro-organismes du sol (Nwuche et Ugoji, 2008).

D'autres contaminants ont pareillement des impacts sur le fonctionnement des écosystèmes. Prenons l'exemple des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ces composés issus d'une combustion incomplète de matières organiques peuvent être d'origine naturelle (feux de forêt) mais la plupart sont issus de combustibles fossiles. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques ont des effets cancérigènes et mutagènes et leurs effets toxiques sur l'homme et sur son environnement en ont fait un souci environnemental majeur ces dernières années (Haritash et Kaushik, 2009). Néanmoins, de nombreuses espèces de micro-organismes ont su s'adapter et utilisent ces composés comme substrat pour leur croissance (Aitken *et al.*, 1998) alors que d'autres en subissent les effets toxiques notamment en réduisant la production enzymatique (Maliszewska-Kordybach et Smreczak, 2003). Les hydrocarbures aromatiques polycycliques modifient donc le fonctionnement des écosystèmes qui y sont exposés. Un autre type de contamination régulièrement étudié est la contamination par des produits phytosanitaires. Ces derniers sont des composés chimiques utilisés en agriculture afin principalement de protéger les cultures contre les ravageurs (insectes, champignons, etc.) ou à prévenir leur action, mais également contrôler le développement d'autres plantes que l'on ne souhaite pas avoir sur un champ à un moment donné.

Ces plantes non désirées sont appelées « adventices » par la communauté scientifique mais sont généralement plus connues sous le nom de « mauvaises herbes ». Il existe plusieurs grands types de produits phytosanitaires tels que les insecticides, fongicides ou encore herbicides dont le nom précise leurs cibles. Mais l'ensemble de ces molécules sont des « biocides », c'est-à-dire qu'elles sont destinées à détruire du vivant. Les êtres vivants ayant en commun un certain nombre de procédés physiologiques, il est extrêmement difficile de développer des biocides ciblés pour une espèce particulière et les effets non désirés ont parfois des conséquences majeures sur le fonctionnement de l'environnement.

Par ailleurs, il est important de noter que les activités humaines ont introduit dans les sols une multitude de contaminants. Cette multi-contamination pose des difficultés particulières en raison des interactions possibles entre les contaminants présents.

## 4 Quels liens entre sols contaminés et dérèglement climatique ?

Si, dans le monde, une grande majorité des sols fait face à des problèmes de contamination, on prévoit aussi qu'ils devront faire face au dérèglement climatique. Prédire comment ces sols vont réagir au double stress que représentent la contamination et le dérèglement climatique nécessite de faire appel à plusieurs disciplines à la croisée de l'écotoxicologie, de la climatologie et de la biogéochimie. La plupart des études s'intéressant à ce double stress, écologique et chimique, est effectuée en laboratoire dans des conditions contrôlées, mais leurs extrapolations à des situations de terrain restent complexes. Ces études en laboratoire restent indispensables à la compréhension du fonctionnement de ces systèmes.

Pour l'instant, beaucoup de travaux se sont concentrés sur la réponse à un stress de contamination à différentes températures. Par exemple, les travaux de Tobor-Kapłon *et al.* (2006) montrent que l'activité microbienne dans les sols diminue suite à une contamination au zinc. Cette diminution est d'autant plus forte que la température augmente. Peu d'études s'intéressent aux effets des changements d'humidité du sol et de son impact sur la réponse des organismes à des contaminants. Néanmoins, les expériences menées nous apprennent que la biodiversité microbienne des sols est affectée par les pesticides et ce plusieurs semaines après leurs apports ; l'importance quantitative de ces effets sur la biodiversité microbienne étant différente en fonction du régime de pluie. Les fonctions enzymatiques majeures de la communauté microbienne seraient en revanche modifiées par les pesticides de la même manière quel que soit le régime de pluie (Ng *et al.*, 2014). Peu de scientifiques travaillent sur les sols avec une vision intégrée du dérèglement climatique (changement de température et de précipitations) et de ses interactions avec les effets d'un contaminant. À titre d'exemple, Gonzalez-Alcaraz *et al.* (2015) ont montré chez une espèce d'enchytréides (un petit ver blanc d'intérêt écologique dans les processus du sol) que son taux de

---

<sup>1</sup> Les teneurs classiquement rencontrées du fond pédogéochimique des sols de France en cuivre sont dans la gamme de 2 à 20 mgCu/kg sol, et on peut retrouver des teneurs en cuivre pour des sols sous vigne avoisinant les 400-500 mgCu/kg sol.

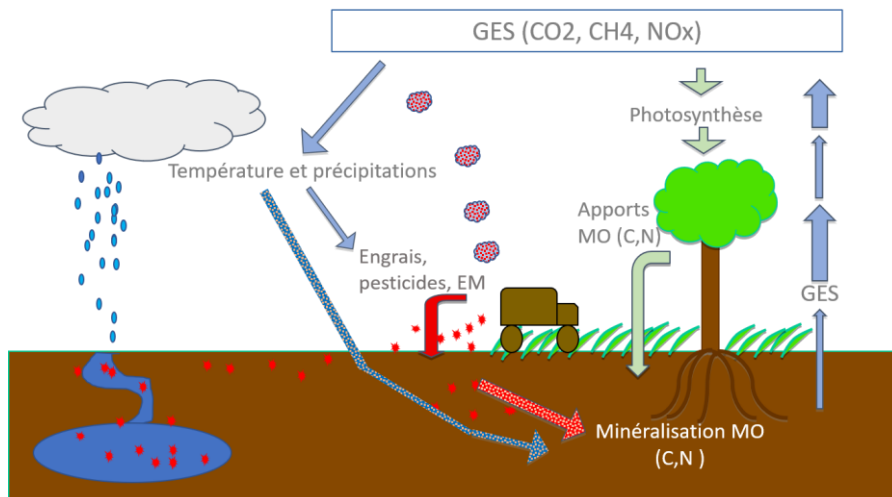
reproduction diminue en présence d'éléments trace issus d'une mine et que cette diminution est d'autant plus forte lorsque la température augmente et que l'humidité des sols diminue.

Les quelques études existantes nous apprennent donc que la réponse des écosystèmes à la contamination, et notamment celle des sols, est pilotée par le dérèglement climatique. En corollaire il est raisonnable d'envisager que les flux de carbone entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres pourraient être affectés en fonction des niveaux de contamination dus à l'apport de polluants dans les sols. Quantifier cet effet permettrait d'améliorer les prédictions des modèles numériques de climat qui, actuellement, prennent en compte les rétroactions entre climat et cycle du carbone mais pas les effets des contaminants sur les flux de carbone. Si les effets dont nous parlons ici sont quantitativement importants, leur non-prise en compte dans les modèles numériques de climat pourrait donner lieu à d'importantes erreurs que nous devons nous efforcer de réduire. C'est en ce sens que des recherches récentes ont été impulsées et que de plus en plus de ponts sont lancés entre ces disciplines.

Il est important de noter que, dans la vision proposée ci-dessus, les contaminants sont vus majoritairement comme des éléments spatialement non mobiles, alors qu'en réalité ils peuvent être très mobiles et passer d'un compartiment d'un écosystème à un autre (d'un sol à une rivière) dans des temps très courts. C'est le cas des contaminants solubles tels que la plupart des pesticides, ou des éléments métalliques mobiles comme le cadmium ou le zinc. Si les régimes de précipitation changent à cause du dérèglement climatique, alors les transferts de contaminants par ruissellement ou lixiviation changeront également. La conséquence sera que certains écosystèmes aquatiques pourraient se retrouver plus ou moins contaminés qu'actuellement du simple fait du changement de précipitation, avec des conséquences sanitaires sur notre santé potentiellement importantes. La mise en place de politiques publiques pour réduire la contamination des eaux doit donc absolument prendre en compte le dérèglement climatique. Ceci est très clairement montré dans une étude de Kattwinkel *et al.* (2011). Les auteurs, à l'aide de modèles numériques à l'échelle de l'Europe, définissent des classes de risques d'exposition aux pesticides et regardent comment la distribution de ces classes évolue en appliquant un scénario de dérèglement climatique. Ils concluent qu'en Europe, à l'horizon 2090 les zones à risques augmenteront de 33 à 35 % principalement en raison d'une augmentation des pluies dans certaines régions. Pour la France, cette étude prédit une diminution des risques en zone méditerranéenne car les précipitations y diminueront alors que les risques d'exposition augmenteraient dans plusieurs autres régions à cause d'une augmentation des précipitations (Aquitaine, Grand Est, Hauts-de-France).

## 5 Dérèglement climatique et écotoxicologie

Si l'homme, par ses activités, émet des gaz à effet de serre, les écosystèmes (océans, forêts, prairies, etc.) absorbent des quantités très importantes de ces gaz. En effet, les producteurs primaires (plantes, algues) peuvent fixer du CO<sub>2</sub> – on parle alors de photosynthèse – et transformer ce carbone en biomasse. Ce phénomène permet de diminuer les quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. D'un autre côté, les organismes vivants respirent et rejettent, entre autre, du CO<sub>2</sub> venant ainsi augmenter la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (figure 2). Sur des échelles de temps très longues (10 000-1 000 000 ans), l'équilibre entre ces deux flux naturels peut changer sur le long terme et induire une modification du climat. La différence avec ce que nous vivons aujourd'hui est la vitesse du changement. En effet, depuis le début de la Révolution industrielle (vers 1850) les activités humaines ont émis dans l'atmosphère plus de 2 000 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (IPCC, 2014). De ces 2 000 milliards de tonnes, environ 25 % ont été stockés dans les océans et 30 % dans les écosystèmes émergés (forêt, prairies, etc.), le reste se retrouvant dans l'atmosphère participant ainsi de l'effet de serre (Le Quéré *et al.*, 2015). Si les écosystèmes permettent de limiter l'effet de nos activités sur le climat, une des questions scientifiques majeures est de savoir si les capacités de stockage des écosystèmes vont être maintenues dans les années à venir.



**Figure 2.** Les sols contaminés au centre de deux boucles de rétroaction avec le climat : l'une concernant leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) sous contrôle direct des conditions de précipitations et de température et grâce à l'abondance et à l'accessibilité de la matière organique (MO) comme contrôle thermodynamique des réactions biochimiques, l'autre sur le devenir (accumulation, transport, disponibilité) et l'impact des contaminants (symbolisés en points rouges) dans un climat modifié.

De très nombreuses études visent à apporter des éléments de réponse à cette question, cherchant même dans certains cas à utiliser les capacités naturelles des écosystèmes à stocker du carbone pour atténuer les effets du dérèglement climatique (Smith *et al.*, 2016). Dans cette dynamique, les sols jouent un rôle essentiel car ils constituent un compartiment majeur du cycle du carbone (Minasny *et al.*, 2017). Les flux de carbone des sols vers l'atmosphère sont d'environ 90 milliards de tonnes par an, pour des stocks dans les sols au niveau mondial d'environ 1 500 milliards de tonnes de carbone (Jobbágy et Jackson, 2000). Les flux vers l'atmosphère sont en équilibre avec les flux depuis l'atmosphère du fait de la photosynthèse (Hashimoto *et al.*, 2015). Ces deux flux se compensent, ils ont un effet limité sur les concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ils participent donc peu à la dynamique du climat même si comme nous l'avons écrit plus haut, le stockage de carbone par la photosynthèse compense en partie l'effet des émissions humaines. Les flux d'origine naturelle sont dix fois plus élevés que les émissions de gaz à effet de serre dues à l'action de l'homme. On comprend donc qu'au regard de ces chiffres, des modifications mêmes minimales des flux pourraient avoir un effet important sur la dynamique du climat. Aussi, pour bénéficier des capacités naturelles des écosystèmes à stocker du carbone, nous devons mieux comprendre leur fonctionnement, mais également leurs réponses aux divers stress imposés par les activités humaines. Parmi ces stress, il y a bien entendu les effets du dérèglement climatique présentés brièvement ci-dessus mais aussi les autres aspects liés à la présence de contamination dans les écosystèmes.

Les écosystèmes contaminés subissent un double stress et doivent développer des stratégies d'adaptation. La théorie écologique nous apprend qu'un système organisé (un écosystème, ou une simple communauté de populations par exemple) répond à des stress extérieurs par la production de mécanismes de défenses qui ont un coût énergétique non négligeable. Si ce système organisé est soumis à un ensemble de stress (dérèglement climatique, contaminations, etc.), la réponse à chacun des stress représentera un coût énergétique fort qui pourrait dans certains cas ne pas être supportable et amener le système donné vers un autre état ne rendant pas forcément les mêmes services écosystémiques qu'auparavant. Pour le dire différemment, si un sol subit à la fois des sécheresses et des contaminations, les organismes qui y vivent pourraient disparaître.

## 6 Sols marginaux contaminés, problème ou opportunité ?

Dans le contexte précédemment décrit, les sols dits « marginaux », qui, outre une contamination éventuelle, ont en commun le fait d'être sous-utilisés en raison de propriétés physico-chimiques défavorables ou pour lesquels les coûts liés à une production agricole ou forestière n'apportent pas de plus-value, pourraient être utilisés pour stocker du carbone. Ceci passe par une gestion favorisant la croissance de végétaux qui peuvent être soit naturellement présents soit plantés. Ce dernier type de gestion pose des difficultés liées à la possibilité de faire pousser des plantes à intérêts agronomiques sur ces sols. Si l'objectif de gestion est uniquement orienté vers une augmentation des stocks de carbone des sols, cela peut s'avérer plus simple à mettre en place que dans des systèmes agricoles ou forestiers où des objectifs de rendements et de revenus pour les exploitants doivent être pris en compte, avec notamment un coût important en lien avec le travail du sol et l'utilisation d'intrants.

Pourtant, ces terres marginales délaissées sont désormais convoitées pour différents types d'exploitation, comme celles à des fins de cultures industrielles ou de bioénergie lorsque les surfaces en présence sont importantes. En

particulier, la culture de plantes à vocation industrielle sur des sols marginaux est désormais une alternative forte au fait de laisser ces terrains à l'abandon tout en évitant la compétition avec des cultures alimentaires pour des surfaces fertiles. Suivant les surfaces, l'intérêt est aussi de réhabiliter ces sols délaissés dans le paysage et de favoriser une reconquête par les populations d'espaces dégradés. De nombreuses recherches sont désormais en cours au niveau international (H2020 projects), pour agir à la fois sur les types de plantes compatibles avec les contraintes des sols marginaux (par exemple conditions climatiques extrêmes, terrains très en pente, sols peu profonds ou encore sols contaminés, etc.) et sur leurs modes de gestion. L'objectif est de mettre en place localement des filières assurant la production de matières premières économes en ressources pour une industrie bio-sourcée, et d'augmenter les revenus des agriculteurs grâce à l'accès à de nouveaux marchés et à une valorisation des terres marginales. Dans ce cadre, les sols marginaux contaminés qui ne pourraient pas être utilisés à des fins alimentaires pour des raisons sanitaires, peuvent être utilisés pour la production de biomasses non-alimentaires à vocation industrielle ou énergétique. Leur participation au stockage de carbone dans les sols doit cependant être évaluée au regard de leur fonctionnement en équilibre avec leur contamination, mais la pérennité du nouvel écosystème créé doit aussi être évaluée en contexte de changement climatique. Il faut comprendre que les sols marginaux présentent une diversité de situation très importante et qu'ils ont en commun de ne pas être facilement utilisables pour la production agricole et/ou forestière. Il est donc primordial d'évaluer les politiques de gestion des terres marginales à l'aide d'indicateurs multicritères considérant l'ensemble des composantes environnementales, sociologiques et économiques.

## 7 Conclusion

Si nous souhaitons utiliser les capacités naturelles des écosystèmes à capter les gaz à effet de serre que nous émettons afin de limiter les effets des dérèglements climatiques, il est donc primordial de préserver leur bonne santé. Une des solutions majeures pour limiter les effets du dérèglement climatique proposée par les spécialistes est d'augmenter les stocks de carbone dans les sols. Pour ce faire, il faut que le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère soit capté par des plantes et qu'une fois transformé en biomasse, ce carbone se retrouve dans les sols sous la forme de carbone organique. Des nombreux travaux montrent que l'agriculture industrielle pratiquée dans nos pays développés tend à induire de fortes pertes de carbone organique des sols. Adopter des pratiques vertueuses pourrait permettre de limiter les effets du dérèglement climatique en augmentant le taux de carbone organique des sols. Parmi ces pratiques, on peut citer l'utilisation de couvertures végétales intermédiaires qui consiste à ne pas laisser le sol nu entre deux cultures et donc à faire pousser des plantes d'intérêt agronomique sur ce laps de temps. L'utilisation de toutes les surfaces potentiellement soumises à une gestion humaine (prairies, forêt, champs, etc.) peuvent aussi être une façon de lutter contre les émissions de gaz à serre. Face au manque de surfaces fertiles cultivables, les sols marginaux y compris les sols contaminés peuvent être cultivés, en prenant soin par exemple de mettre en place des plantes à vocation non-alimentaire et non impactées par la présence de contaminants. Par contre, même si les plantes peuvent pousser, la transformation de ce carbone végétal en carbone organique du sol se fait grâce à l'activité des organismes vivants (bactéries, champignons mais aussi vers de terre, collemboles, etc.). Plus la biodiversité d'un sol est grande, plus la possibilité de transformer le carbone végétal en carbone organique du sol est importante et moins le fonctionnement du sol sera impacté par différents stress tant chimiques que écologiques. Pour finir, il faut bien garder à l'esprit que le carbone qui est transformé en carbone organique des sols va rester sous cette forme pendant des périodes allant de quelques mois à plusieurs centaines d'années alors qu'il restera beaucoup moins longtemps fixé dans la plante. Pendant que le carbone est stocké sous forme organique dans les sols, il n'est pas sous forme de gaz à effet de serre et ne participe donc pas au dérèglement climatique, mais cela nécessite d'appliquer ces politiques de gestion des terres sur des temps longs pour éviter de favoriser le relargage du carbone organique nouvellement stocké sous forme de CO<sub>2</sub>.

Si nous souhaitons utiliser les capacités naturelles des écosystèmes à capter les gaz à effet de serre que nous émettons afin de limiter les effets des dérèglements climatiques, il est donc primordial de préserver leur bonne santé. Une des solutions majeures pour limiter les effets du dérèglement climatique proposée par les spécialistes est d'augmenter les stocks de carbone dans les sols. Pour ce faire, il faut que le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère soit capté par des plantes et qu'une fois transformé en biomasse, ce carbone se retrouve dans les sols sous la forme de carbone organique.

Pendant que le carbone est stocké sous forme organique dans les sols, il n'est pas sous forme de gaz à effet de serre et ne participe donc pas au dérèglement climatique, mais cela nécessite d'appliquer ces politiques de gestion des terres sur des temps longs pour éviter de favoriser le relargage du carbone organique nouvellement stocké sous forme de CO<sub>2</sub>. L'utilisation de toutes les surfaces potentiellement soumises à une gestion humaine (prairies, forêt, champs, sols urbains, etc.) peuvent ainsi être une façon de lutter contre les émissions de gaz à serre. Face au manque de surfaces fertiles cultivables, les sols marginaux y compris les sols contaminés comme certains sols urbains peuvent être cultivés, en prenant soin par exemple de mettre en place des plantes à vocation non-alimentaire et non impactées par la présence de contaminants. Par contre, même si les plantes peuvent pousser, la transformation pérenne de ce carbone végétal en carbone organique du sol se fait grâce à l'activité des organismes

vivants (bactéries, champignons mais aussi vers de terre, collemboles, etc.). Cette activité peut être impacté par la présence de contaminants, il est donc nécessaire de prendre en compte la contamination du sol. Il faut en effet garder à l'esprit que le carbone, une fois transformé en carbone organique des sols va rester sous cette forme pendant des périodes allant de quelques mois à plusieurs centaines d'années alors qu'il reste beaucoup moins longtemps fixé dans la plante. Néanmoins, au regard des faibles surfaces que représentent les sols urbains en comparaison aux autres sols marginaux, leurs mises en culture bien qu'ayant d'autres impacts positifs sur le bien-être humain n'aurait qu'un impact limité sur la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.