



Séquestration de carbone, résilience, 4 pour mille et autres concepts appliqués aux sols de Guadeloupe

Jorge Sierra

Unité Agrosystèmes Tropicaux, INRA Antilles-Guyane
Domaine Duclos, Petit-Bourg, Guadeloupe, France
jorge.sierra@inra.fr

Juin 2019

Table de matières

Résumé	1
I- Introduction	2
II- Un outil pour l'interprétation des concepts : le bilan de matière organique	3
Les éléments du bilan.....	3
Les équations du bilan.....	5
III- Concept 1 : Equilibre	6
Définitions	6
Exemples d'équilibre en Guadeloupe	6
Interprétation agronomique de l'équilibre	8
IV- Concept 2 : Changement climatique	9
Définitions	9
Exemples d'impact du changement climatique en Guadeloupe	10
Interprétation agronomique de l'impact du changement climatique	11
V- Concept 3 : Séquestration de carbone dans le sol	13
Définitions	13
Exemples de séquestration de carbone en Guadeloupe	13
Interprétation agronomique de la séquestration de carbone	14
VI- Concept 4 : Résilience	15
Définitions	15
Exemples de résilience en Guadeloupe	15
Interprétation agronomique de la résilience	16
VII- Concept 5 : 4 pour mille.....	17
Définitions	17
Exemples de 4 pour mille en Guadeloupe	17
Interprétation agronomique du 4 pour mille.....	18
VIII- Conclusions	20

Résumé

Les sciences agronomiques ont incorporé ces dernières années un ensemble de mots clés et de concepts qui, parfois mal relayés ou utilisés hors contexte, peuvent être une source de malentendus sur l'origine et l'impact des actuels dérèglements environnementaux. L'objectif de ce rapport est de clarifier le cadre d'utilisation de cinq termes couramment utilisés dans les travaux concernant la dégradation des sols : **équilibre**, **changement climatique**, **séquestration de carbone (C) dans les sols**, **résilience** et **4 pour mille**. Nous illustrons ces notions en utilisant des résultats obtenus par l'INRA en Guadeloupe sur la fertilité organique des sols.

Nous traitons le concept d'**équilibre** sur la base des entrées et des sorties de matière organique (MO) du sol, lesquelles sont gérées par l'agriculteur via les pratiques culturales appliquées, et insistons sur le fait qu'il n'y a pas de "*bons*" et de "*mauvais*" équilibres. Le **changement climatique** perturbe cet équilibre en exacerbant les sorties (pertes) de MO dans la plupart des cas observés en Guadeloupe. Cette situation n'est pourtant pas irréversible car la **séquestration de C** peut être utilisée pour contrebalancer l'impact négatif du changement climatique, et assurer que la **résilience** du sol puisse jouer tout son rôle dans l'installation d'un phénomène de quasi-équilibre dynamique afin de préserver durablement la qualité du sol.

Finalement, nous discutons l'initiative française du **4 pour mille**, destinée à limiter le réchauffement climatique via la compensation des émissions de gaz à effet de serre. Cette initiative fait appel à la séquestration de C dans les sols afin de réduire le niveau de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique. Nous montrons que le 4 pour mille est d'application difficile à l'échelle du territoire guadeloupéen à cause des facteurs biophysiques et socioéconomiques. Son application à l'échelle locale (exploitation, petite région) requiert des incitations économiques afin de faire face aux coûts des intrants organiques nécessaires à sa mise en place.



Crédit Thinkstock

I- Introduction

Depuis quelques années de nombreux termes techniques sont apparus dans les sciences agronomiques en liaison, notamment, avec les dérèglements environnementaux tels que le changement climatique, les pollutions, la dégradation des sols et l'effondrement de la biodiversité. Quelques-uns de ces dérèglements interpellent aussi l'agriculture antillaise.

Ces termes, relayés quelquefois sans explicitation de leur définition et du contexte d'application, peuvent être à l'origine de malentendus sur les causes et les conséquences des dérèglements. Certains de ces termes ne sont pas nouveaux : appliqués d'abord dans d'autres disciplines, ils ont été récupérés par les sciences agro-environnementales afin d'analyser des problématiques émergentes. C'est le cas de la "résilience", qui fait aussi partie du langage courant, et fait référence à l'aptitude des agro-écosystèmes à faire face aux perturbations naturelles (p.ex. cyclones, incendies, sécheresses) ou d'origine anthropique (p.ex. pollutions diverses, dégradation des sols, réchauffement climatique).

Dans d'autres cas, le terme est nouveau mais il désigne un concept déjà traité par les sciences agronomiques. Ainsi, la "séquestration de C" dans les sols, terme relativement récent, synthétise ce que dans les années 1970 on nommait simplement "augmentation de la teneur en matière organique (MO)", dans le cadre des travaux sur la conservation des sols. Dans ce cas précis, l'introduction du terme "séquestration du C" est très efficace car il peut être relié directement aux "émissions de C", aux "gaz à effet de serre (GES)" et au "changement climatique", ce qui donne au concept un sens davantage agro-environnemental.

L'objectif de ce rapport est de revisiter cinq de ces termes et concepts et de les appliquer aux sols de la Guadeloupe, en particulier à leur fertilité organique : **équilibre, changement climatique, séquestration de C, résilience et 4 pour mille**. Pour cela nous allons présenter des situations et des résultats que nous avons eu l'occasion d'analyser lors de nos études menées à l'INRA Antilles-Guyane. Ces résultats concernent, d'une part, des mesures réalisées directement dans les parcelles des agriculteurs et, d'autre part, des simulations effectuées avec le modèle MorGwanik¹, notamment dans les situations où l'expérimentation n'est pas possible car elles concernent l'avenir (p.ex. 4 pour mille) ou un passé mal renseigné (p.ex. manque d'analyses des sols). Le but est de clarifier le domaine d'application de ces termes et de montrer comment ils peuvent être utilisés pour comprendre les évolutions possibles des sols en Guadeloupe.

¹ MorGwanik est un modèle d'évolution des stocks de MO dans les sols sous l'impact des pratiques appliquées par les agriculteurs et du changement climatique. Il a été conçu, calibré et testé à l'INRA Antilles-Guyane pour les sols de la Guadeloupe. <http://toolsforagroecology.antilles.inra.fr/morgwanik/>

II- Un outil pour l'interprétation des concepts : le bilan de matière organique

Les éléments du bilan

Les cinq termes que nous analyserons dans ce rapport font référence au bilan de MO du sol (Figure 1). Comme la MO est constituée par plus de 50% de C organique, son bilan est défini par les entrées et les sorties de cet élément². Les entrées ont surtout deux origines : le C des résidus de récolte (y compris les racines) et celui des amendements organiques (composts, fumiers, etc.). La quantité de C de la première source dépend donc des caractéristiques de la culture (biomasse produite, rendement, qualité des résidus). Dans le cas des amendements, elle dépend de la dose apportée et de la qualité du produit. La qualité des résidus et des amendements (rapport C/N, teneur en fibres) détermine leur humification, c'est à dire la fraction du C apporté qui rentrera effectivement dans la MO du sol. Le C non humifié est respiré par les microorganismes décomposant les résidus et les amendements, et est libéré sous la forme de CO₂ vers l'atmosphère (Figure 1). **Ce CO₂ ne contribue pas à l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère car il s'agit d'un processus de recyclage naturel de C : CO₂ atmosphérique → C fixé par photosynthèse → C dans les plantes, puis dans les animaux et les amendements → respiration → CO₂ atmosphérique.** Il peut être considéré tout au plus comme un manque de C à gagner pour le sol.

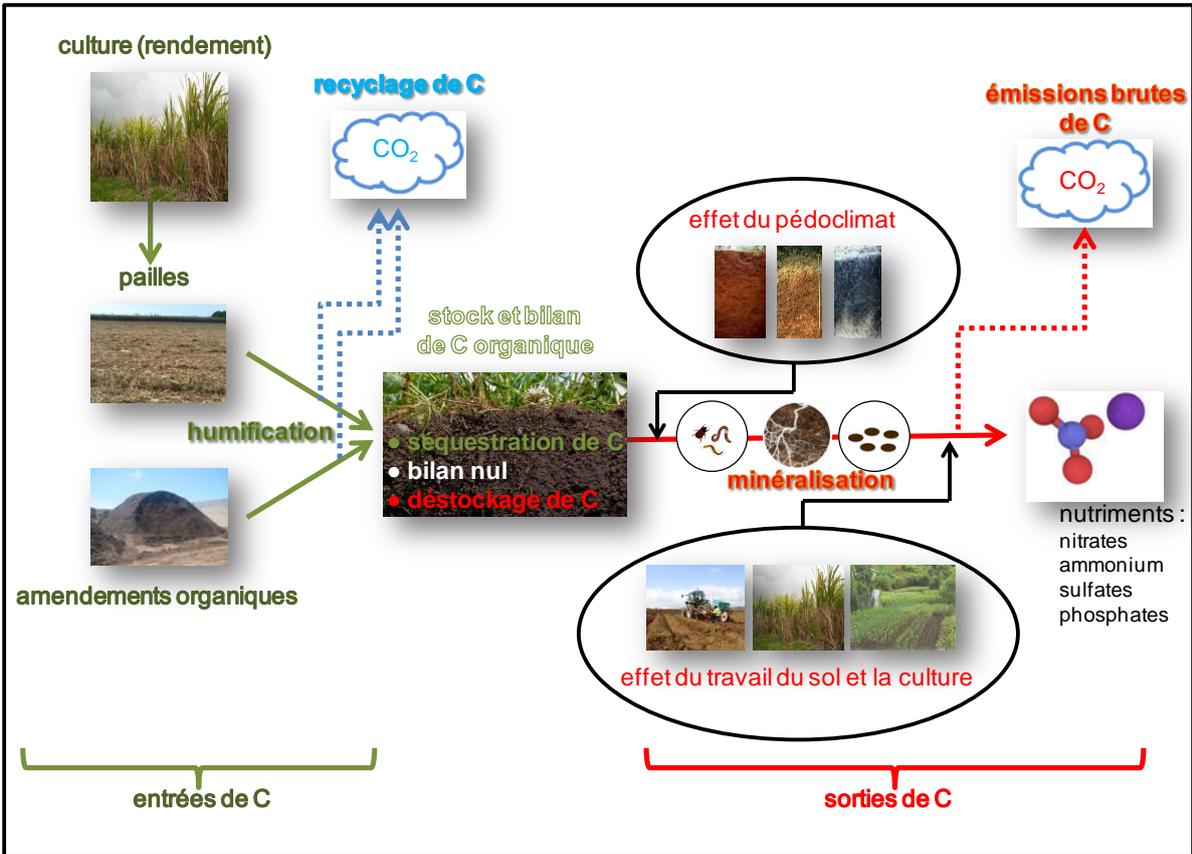


Figure 1 : Schéma du bilan de C organique dans le sol.

² Dans ce rapport nous utilisons les termes MO et C organique du sol indistinctement.

Les sorties de C sont principalement associées à la minéralisation de la MO, c'est à dire à sa décomposition naturelle (biologique). Ce processus est affecté par le pédoclimat et par le système de culture (Figure 1). Par exemple, en Guadeloupe la minéralisation de la MO est plus grande dans les ferralsols du nord de la Basse-Terre que dans les vertisols de la Grande-Terre, à cause d'un climat plus humide et de la présence d'argiles qui protègent moins la MO que celles des vertisols. Aussi, la minéralisation est plus forte sous maraîchage que sous canne à sucre à cause d'un travail du sol plus intensif qui contribue à rendre la MO plus susceptible à la décomposition microbienne. Les produits finaux de la minéralisation sont des sels (nutriments disponibles pour la plante : azote, phosphore et soufre contenus sous des formes organiques dans la MO) et du CO₂ (émission brute).

Le bilan de MO peut être positif (séquestration de C), nul (équilibre) ou négatif (déstockage de C). Si le bilan de MO est négatif (sorties > entrées), **le résultat est une émission nette de CO₂ positive qui contribuera à l'augmentation du CO₂ atmosphérique** (émissions brutes > humification). Si le bilan est positif (sorties < entrées), le résultat est une émission nette négative (émissions brutes < humification), c'est à dire une fixation (séquestration) du CO₂ atmosphérique sous la forme de MO dans le sol. Le bilan est nul quand les entrées et les sorties sont égales (équilibre).

D'une façon générale, les pratiques et les facteurs qui favorisent les sorties de C (p.ex. intensification du travail du sol, réchauffement climatique) contribuent aux émissions nettes positives, et les pratiques et systèmes de culture qui favorisent les entrées de C (p.ex. jachères, polyculture-élevage, agroforesterie, apport d'amendements organiques, réduction du travail du sol) contribuent à fixer le CO₂ atmosphérique dans le sol.

Il est important de souligner que la séquestration et le déstockage de C ne sont pas linéaires dans le temps puisque les taux d'augmentation ou de réduction des stocks diminuent d'année en année. De ce fait, le sol a une tendance à trouver un équilibre (par le haut ou par le bas) où le résultat annuel du bilan de C est nul (Figure 2). **Dans d'autres termes, les teneurs en MO ne peuvent pas augmenter ou diminuer indéfiniment.** Le temps nécessaire pour que le sol atteigne un nouvel équilibre, suite à une période de transition, de stockage ou de déstockage, dépasse normalement les trois décennies.

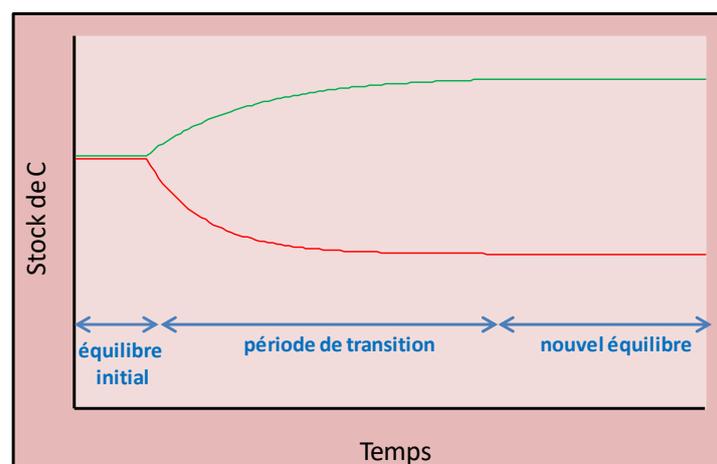


Figure 2 : Exemple d'évolution des stocks en C du sol entre deux situations d'équilibre. La période de transition est associée à un changement des pratiques ou des systèmes de culture qui provoquent l'augmentation (en vert) ou la diminution (en rouge) des stocks.

Les équations du bilan

Les lecteurs qui n'aiment pas les mathématiques peuvent s'abstenir de lire cette section sans rien perdre à la compréhension des concepts que nous discuterons dans ce rapport. Néanmoins, ces équations (très faciles à saisir) permettent de mieux appréhender les facteurs qui affectent la fertilité organique des sols.

Le bilan annuel de MO peut être calculé avec trois équations très simples :

$$\text{Bilan de MO} = \text{Entrées de C} - \text{Sorties de C} \quad (1)$$

$$\text{Entrées de C} = (\text{Quantité} \times \%C \times f_{\text{hum}})_{\text{résidus}} + (\text{Quantité} \times \%C \times f_{\text{hum}})_{\text{amendements}} \quad (2)$$

$$\text{Sorties de C} = \text{Stock de C} \times f_{\text{min}}_{\text{pédoclimat}} \times f_{\text{min}}_{\text{culture}} \quad (3)$$

L'équation (1) correspond à ce que nous avons discuté sur la Figure 1. Les trois variables de cette équation sont exprimées en tonnes de C/ha/an.

L'équation (2) indique que les entrées de C sont déterminées par la masse apportée par chaque source de C (résidus et amendements organiques, Figure 1), leur %C et leur facteur d'humification (f_{hum}). Le f_{hum} des amendements est en général plus grand que celui des résidus de culture.

L'équation (3) indique que les sorties sont le résultat de l'effet des facteurs de minéralisation (f_{min}), associés au pédoclimat et à la culture, sur le stock de C du sol. Le $f_{\text{min}}_{\text{culture}}$ reflète notamment l'impact de l'intensité du travail du sol (différent pour chaque système de culture) (Figure 1).

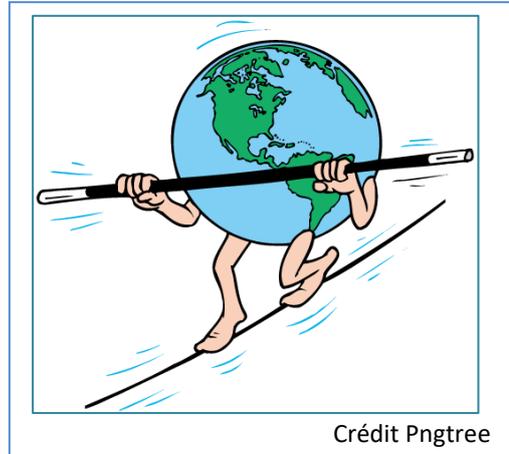
III- Concept 1 : Equilibre

Définitions

Parmi les nombreux sens d'"équilibre" qui figurent dans le Dictionnaire de l'Académie Française, celui qui nous convient le mieux est le suivant : *Etat d'un mélange de substances chimiques dont la concentration ne varie pas dans le temps par absence de réaction ou du fait de l'existence de deux réactions inverses se produisant à la même vitesse.*

Cette définition doit être légèrement modifiée pour l'adapter à notre analyse. D'abord, en ce qui concerne la MO, il ne s'agit pas exactement de la "concentration (qui) ne varie pas dans le temps" mais du "stock" de MO (p.ex. tonnes de MO ou de C/ha). Deuxièmement, dans notre cas il n'y a pas une "absence de réaction" mais "deux réactions inverses se produisant à la même vitesse".

Ces deux réactions correspondent aux entrées et sorties de C (Figure 1). Ainsi, la définition sera reformulée de la manière suivante : *Etat de la MO du sol dont son stock ne varie pas dans le temps du fait que les entrées et les sorties de C ont la même vitesse annuelle.*



Crédit Pngtree

Il est important de souligner que dans cette définition d'équilibre il n'y a aucun jugement de valeur : il n'y a pas un "bon" ou un "mauvais" équilibre, mais **le terme décrit simplement un état particulier de la MO**. Nous verrons par la suite que le jugement de valeur intervient quand nous voudrions **interpréter un niveau d'équilibre donné** en termes de bénéfice ou de contrainte pour l'agriculteur, pour une culture ou pour la santé du sol.

Exemples d'équilibre en Guadeloupe

En Guadeloupe, l'équilibre en MO du sol est en général retrouvé dans les agro-écosystèmes pérennes, sans ou avec peu de perturbations; p.ex. sols forestiers et de savane. En fait, c'est le long-terme et l'absence de perturbations (p.ex. travail du sol) qui permettent la convergence progressive des sorties et des entrées de C et, en conséquence, l'existence d'un bilan nul dans le temps (Figure 2). En agriculture, les sols sous monoculture de canne à sucre et banane s'approchent de ces conditions. Dans la Figure 3 nous présentons quelques exemples d'équilibre pour ces cultures.

Dans la Figure 3a nous comparons la canne à sucre en Grande-Terre et au nord de la Basse-Terre à même rendement. Nous constatons que les deux systèmes sont effectivement à l'équilibre mais que le stock de C n'est pas le même. L'explication de cette différence se trouve dans l'équation (3) : comme le $f_{min_{pédoclimat}}$ est plus grand au nord de la Basse-Terre (climat plus humide, argiles moins protectrices) le stock de C doit être plus faible afin que les sorties de C soient égales aux entrées. Remarquons que ces dernières sont égales dans les deux systèmes car nous avons supposé le même rendement et donc le même volume de résidus. **Cet exemple explique pourquoi les sols caniers de Grande-Terre sont plus riches en MO (moyenne 4.5%) que les sols caniers du nord de la Basse-Terre (moyenne 3.6%).**

Dans la Figure 3b nous montrons deux exemples d'équilibre sous canne à sucre en Grande-Terre pour des cultures à rendement différent. Dans ce cas, l'explication de la différence entre les systèmes se trouve dans l'équation (2) : la Quantité de résidus augmente avec le rendement et le niveau d'équilibre est donc plus élevé pour la culture avec un rendement de 70 tonnes/ha. **Ce qu'il faut retenir de cet exemple, c'est que, en général, le niveau d'équilibre augmente avec le rendement ou, plus exactement, avec la biomasse de résidus de culture apportée.**

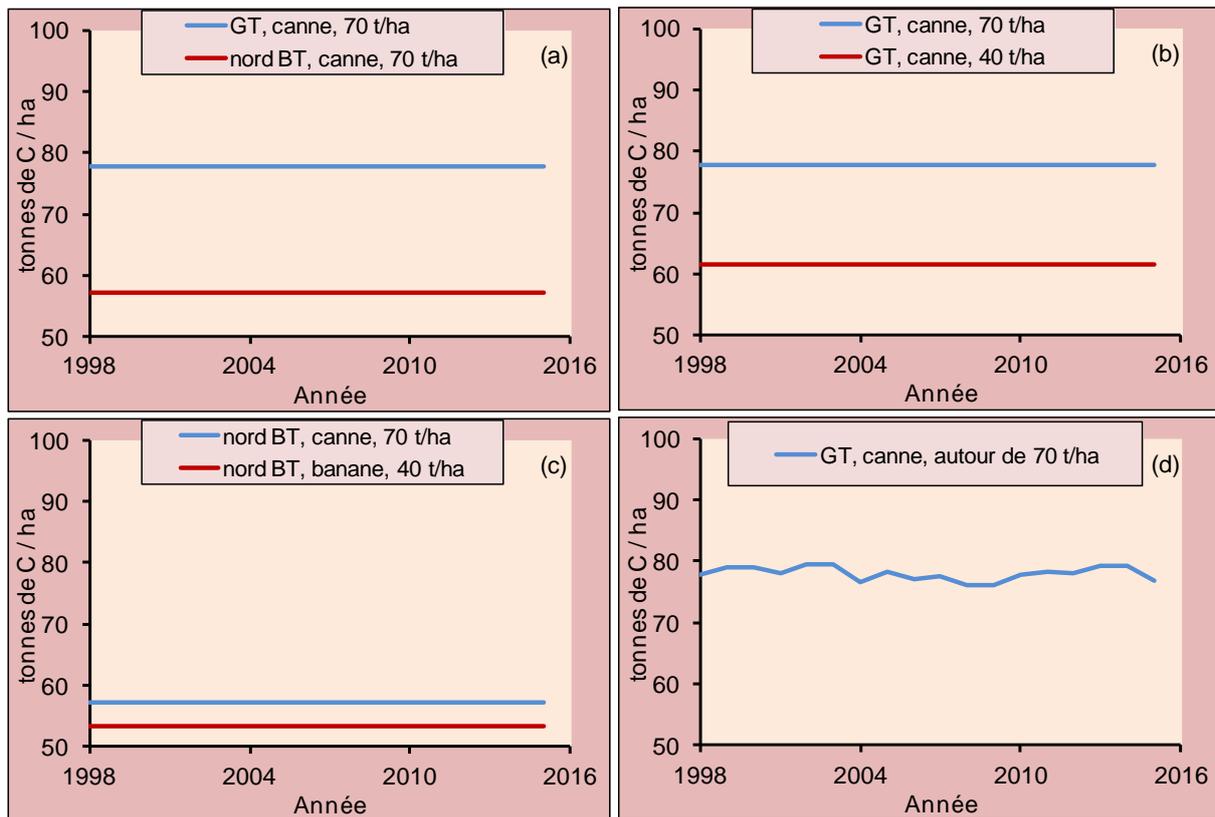


Figure 3 : Exemples d'équilibre en Guadeloupe. GT, Grande-Terre ; BT, Basse-Terre. La période analysée (1998-2015) correspond à celle de la base de données élaborée dans le cadre du projet TropEmis (Sierra et al., 2015).

Dans la Figure 3c nous comparons la canne à sucre et la banane dans le nord de la Basse-Terre. Cet exemple est plus complexe car il y a plusieurs différences entre les deux systèmes : la Quantité de résidus et le $f_{min_{culture}}$ sont plus grands pour la canne et le $f_{hum_{résidus}}$ est plus grand pour la banane. Cette compensation explique pourquoi les différences de stocks entre les deux cultures sont plus faibles que dans les cas précédents des Figures 3a et 3b. Dans l'exemple de la Figure 3c le stock de C est plus grand sous canne. **Pourtant, notre expérience nous indique que dans les communes où les deux cultures coexistent (p.ex. Petit-Bourg, Lamentin, Sainte-Rose), le niveau d'équilibre est parfois plus grand sous banane.** Ces variations dépendent fortement de la gestion (p.ex. fertilisation) et des rendements des deux cultures dans chaque situation particulière.

La Figure 3d est présentée pour montrer que l'équilibre parfait n'existe pas (ligne droite dans les figures précédentes), et qu'il s'agit essentiellement d'un **équilibre dynamique qui doit être perçu davantage comme une tendance vers la stabilité des teneurs en MO**

dans le long terme. Les légers changements du bilan de MO dans le temps peuvent être dus à plusieurs facteurs : la variabilité des rendements, de la biomasse de résidus et/ ou de la minéralisation à cause des conditions climatiques (p.ex. température et pluviométrie). Cette tendance en "dents de scie" explique pourquoi il est extrêmement difficile de visualiser une situation en équilibre dans le court terme (p.ex. moins de 5 ans). **Afin de simplifier la présentation des exemples, nous continuerons à montrer des lignes sans fluctuations dans le temps, mais il convient de retenir que ce type d'évolution n'existe pas dans la nature.**

Interprétation agronomique de l'équilibre

La première conclusion que l'on peut tirer d'une situation en équilibre de MO est que le sol n'est pas soumis à un processus de dégradation. Cela est particulièrement important pour les sols où le niveau d'équilibre est élevé (p.ex. andosols d'altitude sous banane au sud de la Basse-Terre). En effet, la probabilité de dégradation est plus grande dans les sols riches en MO, ce qui ressort directement de l'interprétation de l'équation (3) : pour un pédoclimat donné, le niveau des sorties de C est directement proportionnel au stock de C.

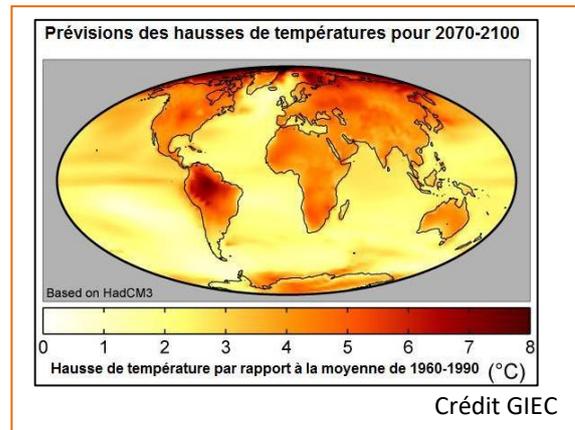
Une situation d'équilibre implique aussi que la fertilité organique ne s'améliore pas, ce qui pourrait être un indicateur négatif quand on applique des pratiques sensées augmenter la teneur en MO (p.ex. apport des amendements organiques). Nous avons eu l'occasion de retrouver des situations de ce type dans certains sols caniers acides du nord de la Basse-Terre, ce qui était vraisemblablement associé à un déficit de phosphore, rendu non disponible à cause du pH, qui pénalisait le rendement et la quantité de résidus. Dans ces cas, la réduction du C apporté par les résidus était compensée par le C apporté par les amendements organiques avec pour résultat un bilan nul de C. Ces situations ont permis d'identifier une contrainte de fertilité qui n'était pas en relation directe avec la richesse en MO des sols.

Les exemples que nous venons d'examiner soulignent la nécessité d'analyser régulièrement le sol d'une parcelle (p.ex. au moins tous les 5 ans) afin de détecter très tôt les problèmes de dégradation, de non réponse aux pratiques appliquées et des carences nutritionnelles.

IV- Concept 2 : Changement climatique

Définitions

Le changement climatique (CC) fait référence à la modification durable des paramètres climatiques (moyennes, variabilité et valeurs extrêmes) à l'échelle globale (Terre) et régionale (territoire, océan, pays, continent). Dans son acception la plus actuelle, ce changement est lié aux émissions de GES générées par les activités humaines qui modifient fortement la composition de l'atmosphère (p.ex. CO₂, méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O)).



Du fait que cette évolution générale chevauche les variations inter-annuelles du climat et les cycles de la nature, on ne peut pas déterminer strictement que le CC soit à l'origine d'un phénomène donné à un moment donné (p.ex. l'échouage massif des algues sargasses une année donnée). Pour cette raison, les scientifiques spécialistes du climat s'expriment fréquemment en termes hypothétiques : **"un tel phénomène va dans le sens de ce qui est prévu dans le cadre du changement climatique"**. Il convient aussi de souligner que le CC n'est pas, dans beaucoup de cas, à l'origine d'un phénomène (p.ex. la dégradation de la MO des sols est un processus naturel) mais il l'exacerbe (p.ex. la dégradation de la MO est maintenant accélérée). Dans d'autres cas, il est effectivement la cause principale d'un dérèglement donné (p.ex. fonte de glaciers sur la Cordillère des Andes).

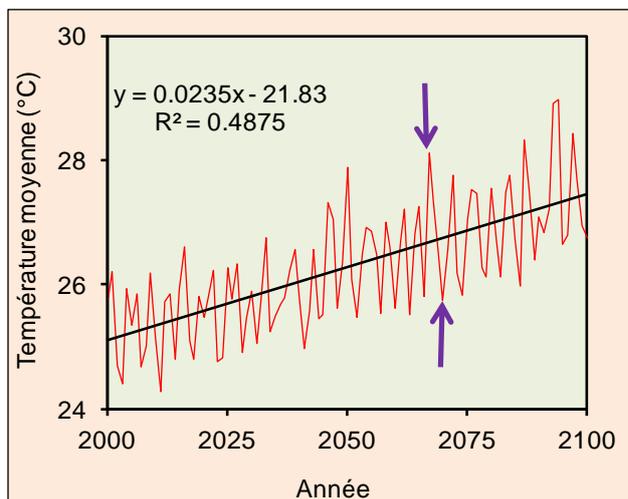


Figure 4 : Evolution de la température moyenne en Guadeloupe entre 2000 et 2100 simulée par Météo France dans le cadre du projet ANR Climator.

Comme nous l'avons aussi souligné pour le concept d'équilibre, le CC doit être perçu comme une tendance dans le temps et non comme un processus en continu sans aucune disruption. La Figure 4 illustre ce phénomène³.

La tendance de la température moyenne en Guadeloupe est d'une augmentation d'environ 0.02°C par an sur le long terme (2.35°C sur les 100 ans simulés par Météo France), mais avec une variabilité importante sur le court terme. Par exemple, la température serait de 28.1°C en 2067 et de 25.8°C en 2070 (flèches en violet dans la Figure 4). Dans le court terme

³ Les résultats de la Figure 4 ne correspondent pas à une réalité future mais à l'un des scénarii possibles élaborés par Météo France sur la base des mesures réalisées en Guadeloupe et de l'évolution du climat global sous l'une des hypothèses du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat).

il peut donc exister une diminution de la température laquelle est néanmoins imbriquée dans une tendance à son accroissement dans le long terme. **Cette variabilité naturelle, amplifiée par le CC, rend extrêmement complexe l'étude des relations entre le climat et les processus de la nature dans le court terme.**

Exemples d'impact du changement climatique en Guadeloupe

Les exemples que nous montrerons dans ce rapport sont issus des simulations réalisées avec le modèle MorGwanik pour la période 2015-2045. La Figure 5a présente l'évolution du stock de C à partir d'une situation d'équilibre sous canne à sucre au nord de la Basse-Terre en 2015. Ce stock ne varie pas si l'on ne considère pas l'impact du CC (sans CC dans la Figure 5a) et il est réduit de 6% sur trente ans si l'on en tient compte (avec CC). La réduction est plus forte sous maraîchage (-31/-32% sur trente ans) mais l'impact du CC est plus faible (1% de différence entre les situations sans et avec CC).

L'exemple de la Figure 5a fournit plusieurs informations :

1) La comparaison "canne sans CC" vs. "canne avec CC" indique que **le concept d'équilibre de MO n'a plus de sens sous l'impact d'un climat qui n'est pas stable**. Paradoxalement, nous déconstruisons ainsi ce que nous avons discuté sur ce concept dans la section précédente. Cette discussion était pourtant nécessaire afin de comprendre l'un des aspects essentiels du changement climatique : **il rend instables les agro-écosystèmes**.

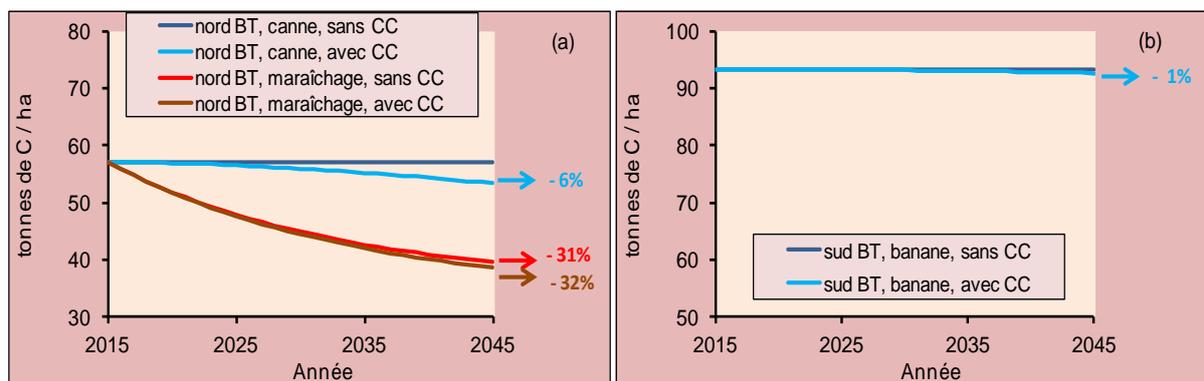


Figure 5 : Exemples d'impact du changement climatique en Guadeloupe. BT, Basse-Terre ; CC, changement climatique. Les simulations ont été réalisées avec le modèle MorGwanik pour la période 2015-2045 sans et avec CC.

2) Pour la canne, il y a deux paramètres du bilan de MO qui sont affectés par le CC et les deux vont dans le sens d'un bilan de MO négatif : * le $f_{\min}^{\text{pédoclimat}}$ augmente avec la température, ce qui booste les sorties de C (équation (3)), * la Quantité de résidus diminue car la température dépasse progressivement l'optimum de croissance de la canne, ce qui réduit les entrées de C (équation (2)). Pour le maraîchage, la situation est différente car l'augmentation du $f_{\min}^{\text{pédoclimat}}$ est partiellement compensée par l'augmentation de la Quantité de résidus. En fait, les plantes maraîchères profitent de l'augmentation du CO_2 atmosphérique pour booster la photosynthèse, et donc la production de biomasse. Pour cette raison, l'impact du CC est plus faible pour ce système de culture. Celui-là est aussi le cas de la banane (Figure 5b), laquelle appartient au même groupe photosynthétique des plantes maraîchères.

3) La forte réduction du stock de C sous maraîchage s'explique principalement par le paramètre $f_{min_{culture}}$, lequel est environ 50% plus grand que celui de la canne à sucre. Cela montre l'impact d'un travail du sol intensif sur le bilan de MO du sol.

4) Finalement, la Figure 5a démontre que **l'impact du système de culture (p.ex. comparaison canne à sucre vs. maraîchage) est plus grand que celui du CC (p.ex. comparaison sans CC vs. avec CC)**. C'est à dire, l'impact du système sur $f_{min_{culture}}$ est plus important que celui du CC sur $f_{min_{pédoclimat}}$. Nous avons trouvé ce même résultat pour les sols de la France hexagonale dans le cadre du projet ANR Climator⁴.

Même si l'effet du CC est plus faible que celui du système de culture il n'est pas négligeable, notamment à l'échelle du territoire de Guadeloupe. Dans la Figure 5 nous avons analysé des cas particuliers de stock de C. Pourtant, au niveau du territoire il y a une large gamme des sols avec des stocks très variables, lesquels peuvent induire des bilans forts différents dans le temps. La Figure 6 montre une synthèse des résultats que nous avons obtenus pour l'ensemble des sols de la Guadeloupe, concernant la variation des teneurs en C entre 2015 et 2045.

Interprétation agronomique de l'impact du changement climatique

Le fait que le système de culture ait un impact plus important que celui du CC est une bonne nouvelle dans le sens que la gestion du système dépend de l'agriculteur, ce qui n'est pas le cas du CC. De ce fait, l'adoption des pratiques stockantes de C, telle que la fertilisation organique, la réduction du travail du sol, l'agroforesterie, parmi d'autres, permettraient de stopper la diminution des stocks de MO, voire de les augmenter.

La promotion de ces pratiques devrait cibler dans un premier temps les sols de la Grande-Terre et du nord de la Basse-Terre, car ce sont les régions qui présentent les plus grandes pertes de MO à cause du CC (Figure 6). Dans ce sens, lors de nos travaux nous avons eu l'occasion de constater que certains maraîchers de ces régions parviennent à préserver la fertilité organique de leurs sols, et même à l'augmenter de 5-10%, en appliquant du compost à une dose de 10 tonnes/ha/an. Ce sujet sera discuté dans la prochaine rubrique.

⁴ Sierra J, 2010. Stockage et déstockage de carbone dans les sols. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : "Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces". Livre Vert du Projet CLIMATOR. ADEME Editions. pp. 105-112.

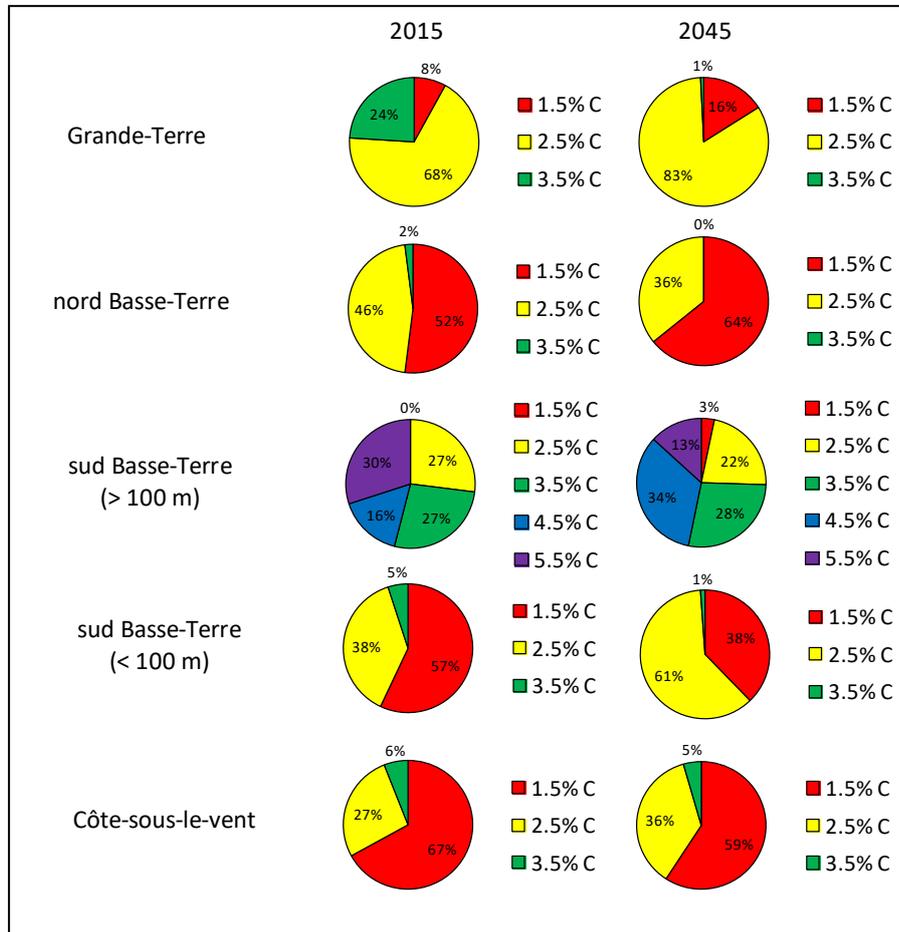
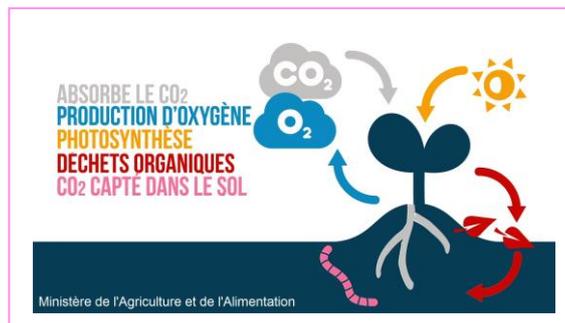


Figure 6 : Evolution des teneurs en C organique entre 2015 et 2045 dans les sols de la Guadeloupe sous l'impact du changement climatique. Pour le sud Basse-Terre : > 100 m et < 100 m font référence à l'altitude. Les estimations ont été réalisées avec le modèle MorGwanik en tenant compte du changement climatique et sans modification de la surface occupée actuellement par chaque culture dans chaque région.

V- Concept 3 : Séquestration de carbone dans le sol

Définitions

La séquestration de C dans le sol est le processus correspondant à un stockage de C où le sol agit comme un puits de C. Comme il a été discuté lors de la présentation de la Figure 1, il y a séquestration lorsque les entrées de C sont supérieures aux sorties de C. Cette séquestration implique un retrait de CO_2 atmosphérique par les plantes et un stockage du C fixé par photosynthèse dans la MO du sol. **La séquestration de C représente un service écosystémique car elle réduit l'impact des émissions de GES sur le réchauffement.**



Les pratiques permettant de séquestrer le C dans le sol (agroforesterie, plantes de couverture, fertilisation organique, réduction du travail du sol) font partie de ce qu'on appelle actuellement Agriculture Climato-Intelligente (Climate-Smart Agriculture, en anglais).

Exemples de séquestration de carbone en Guadeloupe

Dans la Figure 7 nous présentons quelques exemples de séquestration de C observés sous maraîchage au sud de la Basse-Terre. Dans la Figure 7a, nous comparons deux situations de stock de C très contrastées (lignes rouge et verte) afin de montrer que la séquestration de C, toutes choses égales par ailleurs, dépend fortement du stock initial de C : il est plus aisé de l'obtenir dans les sols moins riches en MO (ligne verte) car les sorties de C y sont plus faibles (rappel : le niveau des sorties de C est directement proportionnel au stock de C). Pourtant, l'application du compost à une dose de 10 tonnes/ha/an (ligne bleue) permet de modifier une situation initialement déstockante en séquestrante. La figure 7b indique qu'une telle modification peut aussi être obtenue en réduisant l'intensité du travail du sol. L'effet du travail du sol est associé à la réduction de la valeur du paramètre $f_{\text{min culture}}$ dans l'équation (3).

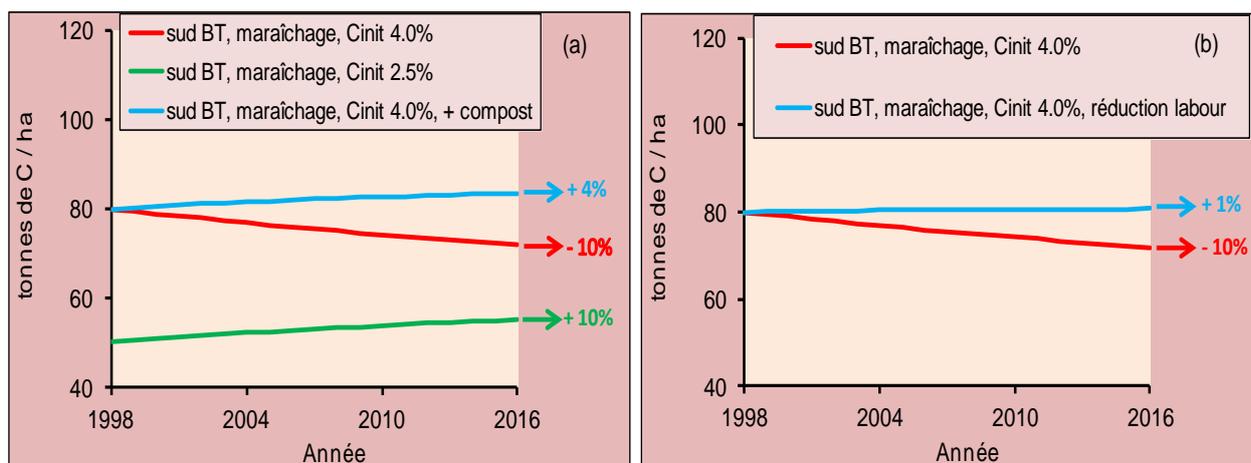


Figure 7 : Exemples des pratiques favorisant la séquestration de C. BT, Basse-Terre. Les résultats correspondent aux observations effectuées pour la période 1998-2016.

Interprétation agronomique de la séquestration de carbone

La séquestration de C offre simultanément deux bénéfices : i- une amélioration progressive de la fertilité du sol et, à moyen et long termes, de la production agricole, et ii- une compensation partielle des émissions de GES et donc une réduction du réchauffement climatique. **Compte tenu que la séquestration de C n'est pas actuellement rémunérée, l'agriculteur aura tendance à réfléchir à ses pratiques en termes du premier des bénéfices cités.** Dans ce cas, le deuxième "bénéfice" représenterait un avantage pour la société mais pas pour l'agriculteur lui-même⁵. Dans ce sens, lors de nos enquêtes nous avons pu vérifier que l'agriculteur justifie ses pratiques séquestrantes en termes de préservation de la qualité des sols et de réduction des coûts (p.ex. diminution de la consommation de carburant en réduisant le travail du sol).

Nos résultats confirment que, en Guadeloupe, la séquestration de C est envisageable dans les sols les moins riches en MO (sols ferrallitiques et nitisols du nord et du sud de la Basse-Terre, respectivement). Augmenter significativement les teneurs en MO des sols les plus riches (p.ex. andosols d'altitude au sud de la Basse-Terre) est très difficile d'un point de vue biophysique, sauf si elle se réalise via une réduction importante du travail du sol. Nous discuterons davantage sur ce point dans la rubrique dédiée au "4 pour mille".

⁵ Cela correspond à ce que les économistes appellent "externalité positive" : le fait qu'un agent économique crée, par son activité, un effet externe en procurant à autrui, sans contrepartie monétaire, une utilité ou un avantage de façon gratuite.

VI- Concept 4 : Résilience

Définitions

La résilience est la capacité d'un système, d'une population ou d'une espèce à préserver ou à revenir sur son fonctionnement initial après avoir subi une perturbation. Par exemple, un écosystème forestier peut retrouver son fonctionnement initial après le passage d'un cyclone, à partir de la banque de graines du sol



Crédit Tocagen.com

ou à partir de la récupération des individus ayant survécu à la perturbation. **Néanmoins, si le niveau de la perturbation dépasse un certain seuil, la capacité de résilience peut être insuffisante pour la surmonter et le système se dégrade.**

Utilisé depuis longtemps en psychologie, **le concept de résilience a été introduit dans les sciences biologiques dans les années 1970-1980** afin de mettre en évidence le rôle de la biodiversité dans la capacité des agroécosystèmes à retrouver leur fonctionnement initial suite à une grande perturbation climatique (p.ex. sécheresse). Le terme est devenu très courant dans les études concernant l'impact des perturbations anthropiques (p.ex. pollutions, perte de biodiversité, changement climatique). Ainsi, il est très utilisé pour décrire les effets de l'intensification de l'agriculture sur la dégradation des sols et leur éventuelle récupération.

Exemples de résilience en Guadeloupe

En ce qui concerne la MO des sols, nous n'avons jamais été confrontés à des situations de résilience en Guadeloupe. Cela est dû à deux raisons. La première est que les sols que nous avons analysés n'ont jamais présenté un niveau extrême de dégradation à cause de l'intensification des pratiques culturales. La deuxième raison est que la période concernée par notre base de données des sols n'est pas suffisamment étendue (début en 1998) pour pouvoir visualiser des phases de dégradation suivies par des phases de restauration. Les exemples que nous présentons dans la Figure 8 ont été donc obtenus avec le modèle MorGwanik pour une période de 30 ans sur la base de nos connaissances des systèmes de culture analysés.

La Figure 8a montre l'exemple d'une rotation de long terme maraîchage/jachère où la jachère fonctionne comme le moteur de la résilience des sols, à cause de l'apport de C de sa biomasse racinaire (Quantité de résidus dans l'équation (2)). L'efficacité de la jachère pour récupérer le niveau initial de MO dépend notamment de la durée de la monoculture maraîchère : plus cette monoculture est longue (ligne rouge), plus de temps sous jachère sera nécessaire pour revenir au niveau initial de MO. La Figure 8b indique que l'effet de la jachère peut être remplacé par une fertilisation organique à une dose de 10 tonnes de compost/ha/an. Dans ces deux cas, la dégradation initiale des sols ne dépasse pas le seuil critique d'irréversibilité, et les sols peuvent ainsi retrouver leur fertilité de départ.

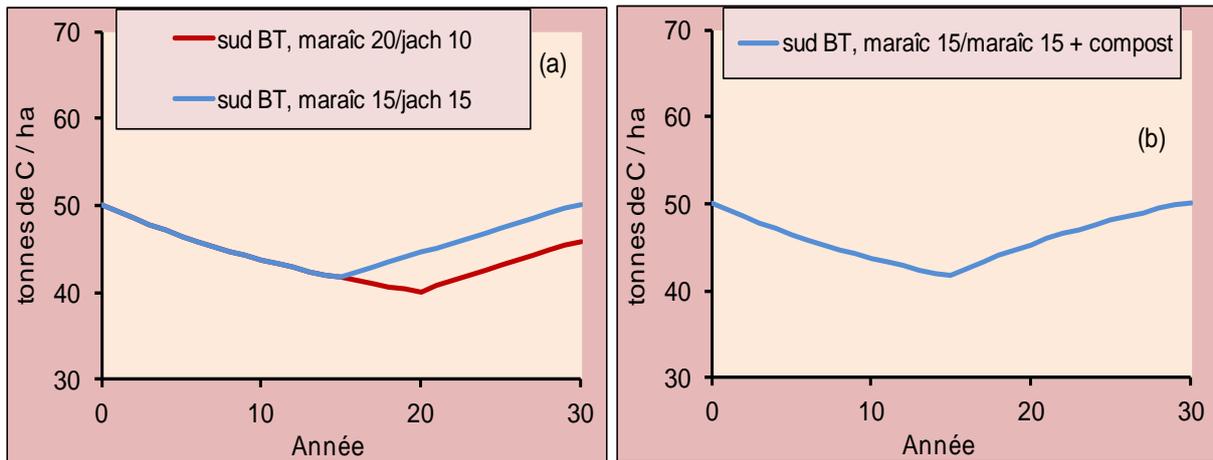


Figure 8 : Deux exemples théoriques de résilience en Guadeloupe. BT, Basse-Terre ; maraïc, maraîchage ; jach, jachère. Les chiffres après la culture indiquent la quantité d'années sous cette culture.

Interprétation agronomique de la résilience

Il est important de souligner que récupérer un sol en voie de dégradation implique souvent un prix à payer. Dans les cas présentés dans la Figure 8, ce prix est représenté par l'absence de production agricole durant la jachère (sauf si celle-ci est utilisée pour l'élevage) et par le coût du compost (achat ou élaboration propre, transport, épandage). **Faire jouer la capacité de résilience des sols d'une manière continue (et à moindre coût !), en évitant des longues périodes de dégradation,** implique l'adoption de systèmes de culture basés sur la réduction du travail du sol, combinée avec une fertilisation organique régulière et des rotations (p.ex. éviter la monoculture maraîchère sans application d'amendements).

VII- Concept 5 : 4 pour mille

Définitions

Le 4 pour mille est une initiative française, présentée à la COP21⁶ en décembre 2015, afin de lancer un programme international de recherche sur la séquestration du C dans les sols. Il s'agit d'augmenter le stock de C des sols de la planète de 4‰ dans les 40 premiers centimètres, ce qui permettrait de stopper l'augmentation actuelle de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Le chiffre 4‰ a été calculé afin de contrebalancer l'augmentation annuelle du CO₂ atmosphérique à cause des émissions anthropiques de C.

A la suite du lancement de cette initiative, un grand débat s'est développé au sein de la communauté scientifique. Les "pros" et les "contres" du 4 pour mille ont pu ainsi étaler leurs arguments concernant la faisabilité et les contraintes d'une telle augmentation du stock de C à l'échelle planétaire. A l'heure actuelle un consensus commence à se dégager sur certains points de cette initiative. D'abord, au delà du chiffre 4‰, ce qui compte c'est de promouvoir la séquestration de C afin d'améliorer la fertilité des sols (très dégradés dans certaines régions de la planète) et de compenser les émissions de C, ce que nous avons discuté dans la rubrique V de ce rapport. Deuxièmement, compte tenu qu'un sol ne peut pas séquestrer du C indéfiniment (voir Figure 2), le 4 pour mille ne peut pas être appliqué au-delà de deux ou trois décennies. Dans ce sens, **le 4 pour mille est proposé comme un moyen de gagner du temps en attendant que des accords internationaux soient obtenus afin de réduire les émissions de C, ou que d'autres procédures soient proposées pour réduire le niveau de CO₂ atmosphérique.** Troisièmement, il n'est pas envisageable d'appliquer le 4 pour mille dans tous les sols de la planète car certains systèmes ne sont pas gérés par l'Homme (p.ex. forêts, savanes) et certains sols sont déjà très riches en MO (aspect discuté dans la rubrique V). **Pour cette raison, la recherche scientifique s'oriente actuellement vers l'identification des régions et des systèmes où cette application serait faisable à un coût raisonnable.** Par exemple, l'INRA a lancé en 2018 une expertise collective afin de réaliser un inventaire de ce type de situation en France métropolitaine.

Exemples de 4 pour mille en Guadeloupe

Le 4 pour mille est un cas particulier de la séquestration de C où le niveau de séquestration à atteindre est fixé du départ. Compte tenu qu'en Guadeloupe nous n'avons pas observé des séquestrations de C de ce niveau chez les agriculteurs, les résultats que nous présentons dans la Figure 9 ont été obtenus avec le modèle MorGwanik. Nous avons considéré l'application du compost comme pratique séquestrante, car elle serait la plus simple à adopter par les agriculteurs. Nous avons évalué deux systèmes de culture très contrastés : le maraîchage au sud de Basse-Terre, avec un travail de sol souvent très intensif



⁶ La COP21 a été la 21ème Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (en anglais, Conference Of the Parties, COP) qui a eu lieu à Paris en 2015.

et des sorties de C importantes, et la canne à sucre en Grande-Terre, avec un travail du sol peu intensif et un bilan de MO proche de l'équilibre.

La Figure 9a montre que l'évolution des stocks est linéaire dans le temps car l'augmentation annuelle de C est constante: 4‰ du stock initial. **Pour obtenir une augmentation constante de C dans un sol qui s'enrichit progressivement (et dont les sorties de C deviennent de plus en plus importantes), la dose de compost à appliquer doit obligatoirement augmenter dans le temps (Figure 9b).** Dans d'autres termes, avant d'induire une séquestration de C de 4‰, le compost doit compenser les sorties de C, dont le niveau augmente chaque année. Les doses de compost ont ainsi augmenté de 14 à 20 tonnes/ha/an sous maraîchage et de 2 à 9 tonnes/ha/an sous canne à sucre.

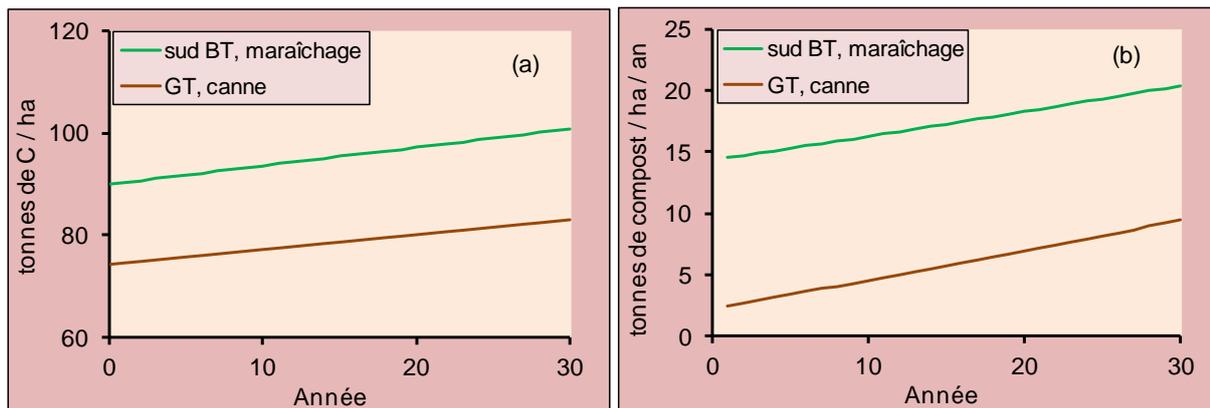


Figure 9 : Deux exemples théoriques de 4 pour mille: (a) augmentation du stock de C à un rythme annuel de 4‰ du stock initial, et (b) quantité annuelle de compost à apporter pour obtenir cette augmentation. BT, Basse-Terre ; GT, Grande-Terre.

Dans les exemples de la Figure 9 nous avons imposé le 4 pour mille afin d'évaluer les conditions nécessaires à son obtention (p.ex. dose de compost). Une autre façon d'aborder le sujet est d'identifier les régions et les systèmes de culture qui en Guadeloupe pourraient contribuer à obtenir le 4 pour mille en tenant compte des pratiques des agriculteurs. Les simulations que nous avons réalisées pour l'ensemble du territoire ont montré que **le 4 pour mille pourrait être atteint sur seulement 18% de la SAU à l'horizon 2045**. Le pourcentage serait de 21%, moyennant une réduction du travail du sol dans les cultures de diversification. La plupart des situations ainsi identifiées correspondent aux sols les plus pauvres en MO du nord et du sud de la Basse-Terre. En général, **le 4 pour mille a été atteint quand la teneur en C organique ne dépassait pas 2%**. Cette valeur peut être considérée comme un seuil critique afin d'évaluer la faisabilité de la pratique dans une situation donnée.

Interprétation agronomique du 4 pour mille

En Guadeloupe, l'application du 4 pour mille pourrait concerner l'échelle locale (parcelle, exploitation, petite région) mais il ne serait pas envisageable au niveau du territoire ou de la région agroécologique au moins dans le court terme. En effet, **la richesse des sols en MO d'une part, et des contraintes socio-économiques d'autre part limitent la fraction de la SAU disponible pour cette pratique**. Parmi ces dernières, l'offre en compost ne suffirait pas à fournir les quantités nécessaires au 4 pour mille. Par exemple, en tenant compte des doses que nous avons calculées (Figure 9b), la production actuelle de compost (environ 20.000 tonnes/an) pourrait couvrir les besoins de seulement 2000-3000 ha/an

éventuellement engagés dans la démarche du 4 pour mille. De plus, la gestion d'un intrant (compost) dont la dose s'accroît dans le temps serait contraignante pour l'agriculteur, même dans la situation où les applications seraient réalisées, par exemple, une année sur cinq. Finalement, comme il a été discuté auparavant, **le 4 pour mille est un service non rémunéré ce qui découragerait son application compte tenu des coûts des intrants nécessaires à son obtention (p.ex. compost)**. Une partie de ces contraintes pourraient être surmontées si l'on considère le changement partiel des systèmes de culture actuels par des systèmes plus performants d'un point de vue environnemental (polyculture-élevage, savanes améliorées, agroforesterie). Effectivement, nous avons constaté lors de nos travaux que ces systèmes peuvent séquestrer du C au niveau de 6-7%. **La labellisation des produits issus de la démarche 4 pour mille pourrait encourager les agriculteurs à adopter ces systèmes.**

VIII- Conclusions

Notre objectif était de clarifier le cadre d'utilisation des cinq termes analysés et d'illustrer leur application concrète en Guadeloupe. La Figure 10 montre les relations entre ces termes tels que nous l'avons discuté dans notre présentation. L'une des conséquences du **changement climatique** est de rendre inopérant le concept d'**équilibre** car le climat lui-même n'est plus stable. La perte de cet équilibre se traduit généralement par une baisse de la fertilité organique à cause de l'accroissement des pertes de C, et la **séquestration de C** est l'outil qui permet de contrebalancer ces pertes, en préservant voire en augmentant le stock carboné du sol.

La **résilience** et le **4 pour mille** sont des aspects particuliers de la séquestration de C. Ainsi, la résilience peut se manifester via la séquestration de C, ce qui permet de reconstituer le stock carboné perdu suite à une perturbation du système. Dans les sols agricoles, la matérialisation de la résilience nécessite de la mise en place des pratiques culturales (amendement organique, réduction du travail du sol, rotations) et/ou des systèmes de culture (agroforesterie, polyculture-élevage) qui accompagnent la réaction biophysique du sol. L'initiative du 4 pour mille fait appel à ce type de gestion du sol afin d'utiliser la séquestration de C pour contrebalancer les émissions de C.

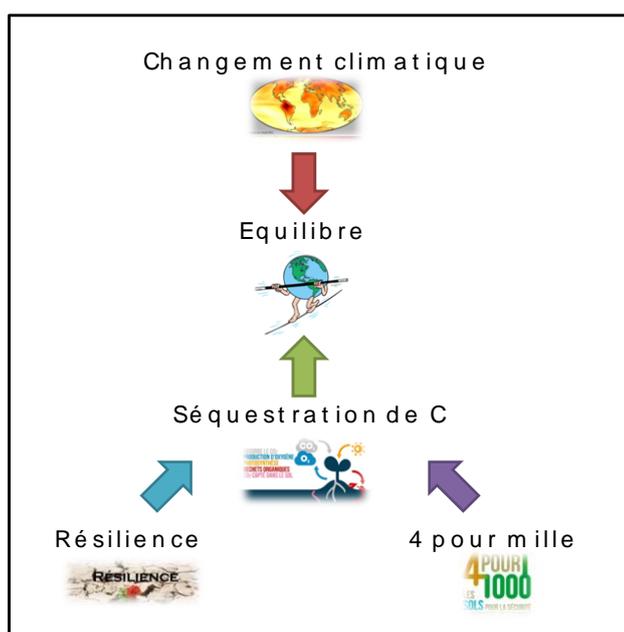


Figure 10 : Relations entre les cinq concepts analysés.

Les résultats de nos travaux suggèrent qu'en Guadeloupe la résilience devrait être perçue comme la capacité des sols à conserver un état de (quasi) équilibre dynamique (voir Figure 3d). C'est à dire, les impacts négatifs associés aux perturbations (intensification de l'agriculture, changement climatique) ne devraient pas induire des dégradations profondes afin de réduire les risques d'irréversibilité. Pour cela, la séquestration de C devrait être développée davantage et gérée afin de compenser les pertes de C dans le moyen terme (p.ex. sur 5 ans). Le 4 pour mille est, à l'heure actuelle, d'application difficile à l'échelle du territoire, mais il pourrait être envisagé à l'échelle de l'exploitation moyennant des incitations économiques pour faire face au coût des intrants nécessaires à sa réalisation.