

**ADEME**



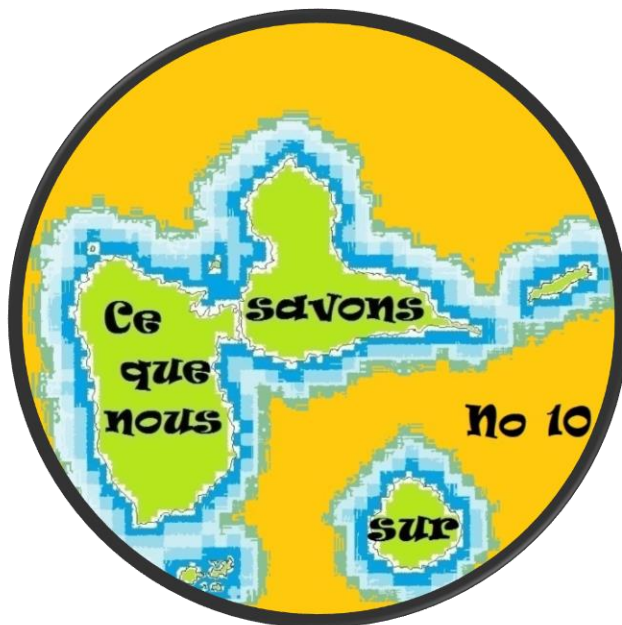
Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie



**REGION  
GUADELOUPE**



**INRAE**  
la science pour la vie, l'humain, la terre



## **Comment l'altitude affecte-elle la dégradation de la matière organique des sols du sud de la Basse-Terre ?**

**Jorge Sierra**

[jorge.sierra@inrae.fr](mailto:jorge.sierra@inrae.fr)

Unité Agrosystèmes Tropicaux, INRAE Antilles-Guyane

Septembre 2020



## Sommaire

Résumé .....	1
1- Contexte .....	2
2- Brève révision sur l'effet des gradients altitudinaux sur la MOS .....	3
3- Méthode pour déterminer l'effet de l'altitude en Guadeloupe .....	4
4- Effet de l'altitude sur la minéralogie du sol et sur le rendement de la banane .....	5
5- Gradient altitudinal de la MOS : effet du système de culture .....	6
6- Gradient de décomposition de la MOS : sensibilité au travail du sol et au réchauffement climatique.....	6
7- Conclusions.....	8

Note : MOS indique la matière organique du sol

Crédit photo page de couverture : F. Beauducel, IPGP, 2005.

## Résumé

Les sols d'altitude du sud de la Basse-Terre (andosols) sont caractérisés par des stocks de matière organique très élevés qui peuvent être particulièrement sensibles à l'intensification du travail du sol et au réchauffement climatique. **Cette sensibilité est déterminée par la vitesse de décomposition de la matière organique. Dans cette étude nous avons estimé pour la première fois le gradient altitudinal du taux de décomposition *in-situ* de la matière organique du sol, et observé qu'il diminue dans les sols de haute altitude**, ce qui explique leurs plus grands stocks en matière organique.

Le rendement de la banane, la quantité de résidus de récolte et le carbone apporté au sol par ces résidus diminuent avec l'altitude, mais ils ne déterminent pas le gradient de matière organique. D'ailleurs, les gradients altitudinaux de température et de pluviométrie, ainsi que la disponibilité de nutriments, ne peuvent pas expliquer la forte réduction du taux de décomposition en altitude. Ce dernier est surtout contrôlé par la minéralogie des sols, laquelle détermine l'accroissement en altitude de la protection physique de la matière organique vis-à-vis de la dégradation provoquée par l'activité microbienne du sol.

**Ce phénomène a d'importantes conséquences sur la résilience des sols aux impacts agro-environnementaux, laquelle augmente fortement dans les sols de haute altitude.** Les résultats obtenus apportent des pistes intéressantes aussi bien pour la recherche agronomique que pour la gestion de pratiques culturales dans le gradient altitudinal du sud de la Basse-Terre.

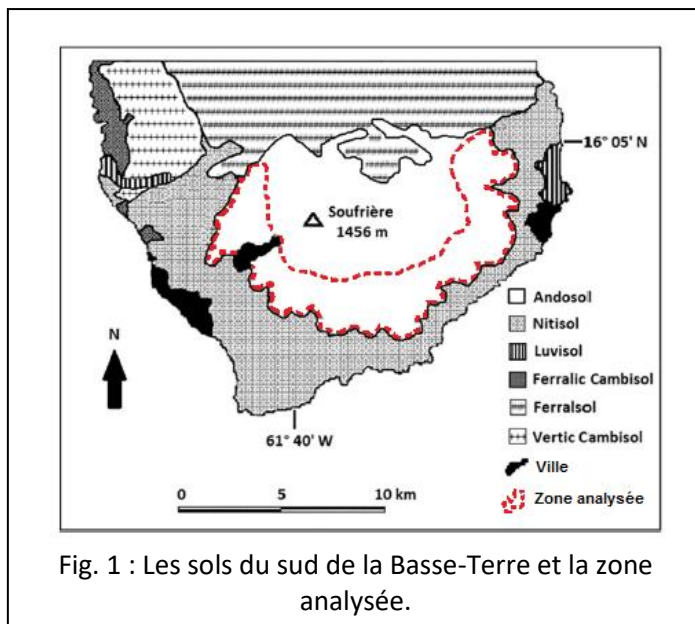


Crédit Y.M. Cabidoche

## 1- Contexte

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet TropEmis<sup>1</sup> financé par l'ADEME, le Conseil Régional de Guadeloupe et le FEDER. Les objectifs de ce projet consistaient à effectuer un diagnostic de la fertilité organique des sols de Guadeloupe, et à évaluer l'impact du changement climatique (CC) sur l'évolution des stocks en matière organique des sols (MOS)<sup>2</sup>. Ces évaluations ont été effectuées sur la base des enquêtes conduites auprès de 470 agriculteurs recouvrant toutes les régions agroécologiques du territoire, l'analyse du changement des stocks en MOS de 250 parcelles suivies pour certaines depuis 1998, et les prévisions de Météo France concernant le CC en Guadeloupe. Nous avons aussi calibré et testé le modèle MorGwanik, conçu pour quantifier l'évolution de la MOS sous l'impact simultané du système de culture, du pédoclimat, et du CC.

Dans ce rapport nous focalisons sur quelques-uns des résultats obtenus sur les sols d'altitude du sud de la Basse-Terre, appelés andosols au sens large<sup>3</sup> (Fig. 1). Ces sols se sont développés sur des dépôts volcaniques récents (Holocène) sous un climat à forte pluviométrie. Ce sont donc des sols jeunes et peu évolués, constitués des argiles appelées allophanes et d'autres gels organo-minéraux amorphes. En fait, l'absence d'une saison sèche ne permet pas la formation d'argiles cristallisées comme dans les cas des sols côtiers du sud de la Basse-Terre (nitisols) et du nord de cette île (ferralsols). En revanche, il y a une abondance de minéraux primaires fragmentés lors de l'altération physique des matériaux volcaniques (p.ex. cendres volcaniques).



Les andosols de Basse-Terre sont caractérisés par des stocks très élevés en MOS, lesquels sont en général 2-3 fois supérieurs à ceux observés dans d'autres régions tropicales d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud. Ce trait confère à ces sols une fertilité chimique très importante, même si parfois ils peuvent aussi présenter une déficience en phosphore, des problèmes de toxicité aluminique, et une contamination par certaines molécules pesticides (p.ex. chlordécone).

**A cause de leurs forts stocks en MOS, la déforestation et l'intensification de l'agriculture peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité des andosols, avec des pertes de MOS de l'ordre de 5-6% par an. D'ailleurs, les prévisions réalisées par les climatologues montrent que le réchauffement climatique pourrait avoir**

<sup>1</sup> Evaluation régionalisée de l'EMISSion et de la séquestration de carbone dans les sols TROPicaux de Guadeloupe. Projet réalisé en partenariat avec Dominique David (Carib Agro). Une partie des résultats de ce projet a été présentée dans les No 1 et 8 de la série "Ce que nous savons sur".

<sup>2</sup> Nous utiliserons indistinctement les termes MOS et C organique en sachant que pour les sols de Guadeloupe la teneur en MOS est égale à la teneur en C organique multipliée par 1.8.

<sup>3</sup> Voir le No 5 de "Ce que nous savons sur" pour une description détaillée des andosols.

## des impacts importants sur le fonctionnement des agroécosystèmes de montagne dans les prochaines décennies.

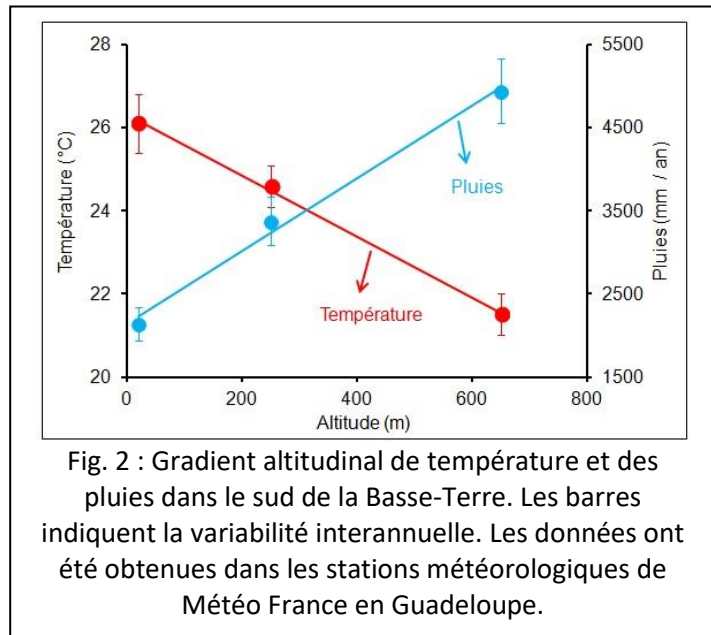
Ces constats nous ont amenés à analyser les effets du climat, de la minéralogie des sols et des systèmes de culture sur la MOS dans le gradient altitudinal des andosols du sud de la Basse-Terre. L'objectif était d'identifier les déterminants de la dynamique de la MOS dans cette région pour pouvoir ainsi évaluer l'effet des pratiques culturales et du CC. **Notre but a été de calculer et d'utiliser le taux de décomposition *in-situ* de la MOS comme un indicateur de la sensibilité des sols à la dégradation.**

## 2- Brève révision sur l'effet des gradients altitudinaux sur la MOS

**Les sols volcaniques occupent moins de 1% de la superficie des terres émergées de la Terre mais ils contiennent environ 5% de leurs stocks de MOS.** Ces sols se trouvent sur les flancs des montagnes et ils sont en général boisés ou, notamment en milieu tropical, occupés par des activités agricoles comme dans la Caraïbe. La plupart des études réalisées sur les écosystèmes naturels de montagne ont mis en évidence une augmentation des stocks de MOS avec l'altitude. D'une façon générale, l'augmentation de l'altitude est accompagnée par celle de la pluviométrie et par la diminution de la température (p.ex. Fig. 2), ce qui affecte fortement la végétation (p.ex. type, quantité et qualité de la litière) et le sol (p.ex. minéralogie, structure physique, activité microbienne, nutriments). Ces facteurs peuvent, en retour, affecter le stock de MOS.

Plusieurs processus ont été proposés dans la littérature internationale pour expliquer l'augmentation des stocks de MOS avec l'altitude dans les écosystèmes naturels : i- une meilleure protection de la MOS en altitude à cause d'une meilleure structuration de sols, ii- une réduction de la décomposition de MOS à cause d'une moindre activité microbienne liée à la diminution de la température, de la disponibilité en phosphore et du pH, iii- une augmentation de l'humification de la litière à cause de l'amélioration de sa qualité en lien avec le changement de végétation. Il a été aussi proposé que l'impact de ces mécanismes est partiellement masqué quand le système naturel est remplacé par des agrosystèmes, du fait que l'agriculture provoque fréquemment une réduction des stocks de MOS. Ainsi, des études menées sur des agrosystèmes de montagne en Afrique et en Asie n'ont pas observé de gradient de MOS.

**Connaitre les facteurs et les mécanismes qui contrôlent le gradient de MOS dans les sols volcaniques d'altitude est nécessaire afin de bien cerner l'impact des pratiques culturales et le CC sur leur qualité, et aussi pour mieux identifier les processus sur lesquels la recherche doit encore s'investir afin d'améliorer l'estimation de ces impacts.** Par exemple, si la diminution de la température avec l'altitude est la cause principale de ce



gradient, la recherche devrait s'intéresser prioritairement à déterminer la sensibilité de l'activité microbienne du sol au gradient thermique, ce qui servirait de base à l'évaluation de l'impact du réchauffement climatique (cas des Andes péruviens). Si en revanche la minéralogie joue un rôle clé dans la protection de la MOS, la priorité devrait être donnée aux études ciblant la structure du sol, ce qui permettrait à posteriori une évaluation plus précise de l'impact des pratiques culturales appliquées par l'agriculteur (cas de certains systèmes en Afrique).

En tout état de cause, les flancs montagneux des îles volcaniques des tropiques, telle que la Guadeloupe, présentent les gradients altitudinaux parmi les plus importants de la planète, avec une large gamme de végétation, des sols (Fig. 1) et des microclimats (Fig. 2). Cela fait de ces régions des cas d'étude particulièrement intéressants pour analyser les facteurs contrôlant le gradient de MOS dans les tropiques.

### 3- Méthode pour déterminer l'effet de l'altitude en Guadeloupe

Nous nous sommes intéressés au gradient compris entre 100 m et 850 m, ce qui nous a amené à travailler uniquement sur les andosols au sens large (Fig. 1). Dans cette zone la température diminue de 0.7°C et les pluies augmentent de 437 mm/an tous les 100 m (Fig. 2). A l'intérieur de ce gradient altitudinal, nous avons sélectionné 198 parcelles sous monoculture de banane et 55 parcelles sous maraîchage incluses dans la base de données du Projet TropEmis. L'information disponible sur ces parcelles concerne les teneurs en carbone et azote organique, cations et phosphore disponible, le pH, ainsi que le type de sol, l'altitude et la gestion des systèmes de culture, y compris celle des amendements organiques. Pour cette étude, cette information a été complétée avec la densité apparente du sol (89 parcelles) et la teneur en allophanes (28 parcelles). Les rendements de la banane étaient disponibles pour 90 parcelles<sup>4</sup>. Au contraire, les rendements des cultures maraîchères n'étaient pas connus.

Les parcelles ont été sélectionnées parmi celles qui n'avaient pas reçu un apport d'amendement organique depuis au moins 15 ans. Cela nous a permis d'estimer le taux de décomposition de la MOS des parcelles sous banane en considérant qu'elles se trouvaient à l'équilibre concernant les entrées (apport de carbone des résidus de récolte) et les sorties de carbone organique (minéralisation de la MOS)<sup>5</sup>. C'est à dire, à chaque altitude, les entrées et les sorties de carbone sont égales et le bilan annuel de la MOS est donc nul. Sous ces conditions, le taux de décomposition de la MOS (TD en %/an) peut être calculé de la manière suivante :

$$TD = (\text{Carbone apporté} \times f_{\text{hum}}) / \text{Stock de carbone} \quad \text{Equation (1)}$$

Le "Carbone apporté" par les résidus de récolte (en tonnes/ha/an) est calculé en connaissant le rendement de la banane, le rapport entre la biomasse des résidus et le rendement, et le taux de carbone de ces résidus. Le "f<sub>hum</sub>" (en %) est le facteur d'humification des résidus (31% pour les résidus de banane). Le rapport résidu/rendement, le taux de carbone des résidus et f<sub>hum</sub> ont été déterminés dans le projet TropEmis. Le

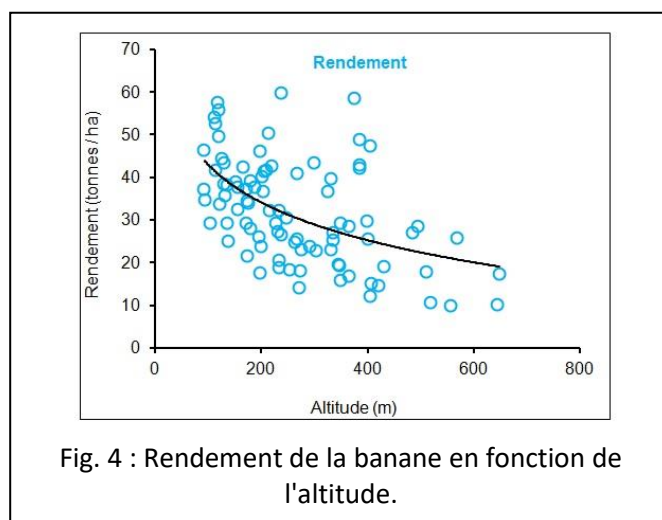
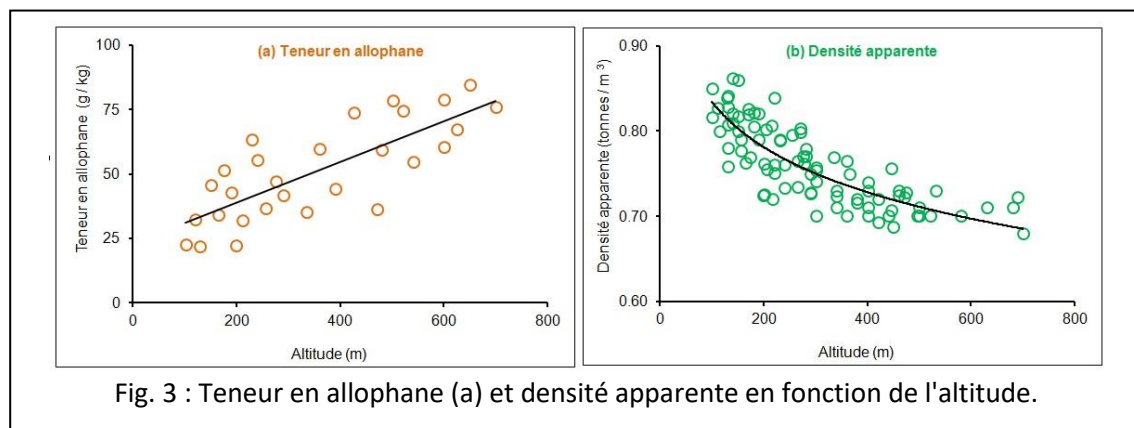
<sup>4</sup> L'information sur les rendements de la banane correspond à l'année 2015 et nous a été gentiment fournie par M Marcus Hery du Groupement des Producteurs de Banane de Guadeloupe.

<sup>5</sup> Le concept d'équilibre est discuté en détail dans le No 8 de "Ce que nous savons sur".

"Stock de carbone" (en tonnes/ha) de chaque parcelle est calculé à partir de la teneur en carbone organique, la densité apparente et la profondeur de la couche de sol considérée (25 cm). Le calcul de TD ne peut pas être effectué pour les parcelles sous maraîchage car elles ne se trouvent pas à l'équilibre du fait d'une diminution progressive du stock de MOS. Nous utiliserons ces parcelles seulement pour les comparer à celles sous banane et pouvoir ainsi analyser l'impact du système de culture sur le gradient de MOS<sup>6</sup>.

#### 4- Effet de l'altitude sur la minéralogie du sol et sur le rendement de la banane

La Fig. 3a montre que la teneur en allophane augmente avec l'altitude. La présence de ce type de minéral amorphe confère aux sols d'altitude une grande micro et macroporosité ce qui se traduit par une grande infiltrabilité et une faible densité apparente (Fig. 3b). **Nous avons ainsi un premier facteur qui peut contrôler le gradient de MOS dans les andosols du sud de la Basse-Terre. En effet, la MOS contenue dans la microporosité des allophanes (plus grande en altitude) est moins sensible à la dégradation microbienne car elle est moins accessible aux microorganismes.**



Le rendement de la banane diminue avec l'altitude (Fig. 4) : d'environ 43 tonnes/ha à 100 m à 20 tonnes/ha à 700 m, ce qui est probablement associé à l'effet de la température sur la longueur du cycle et sur la production de biomasse.

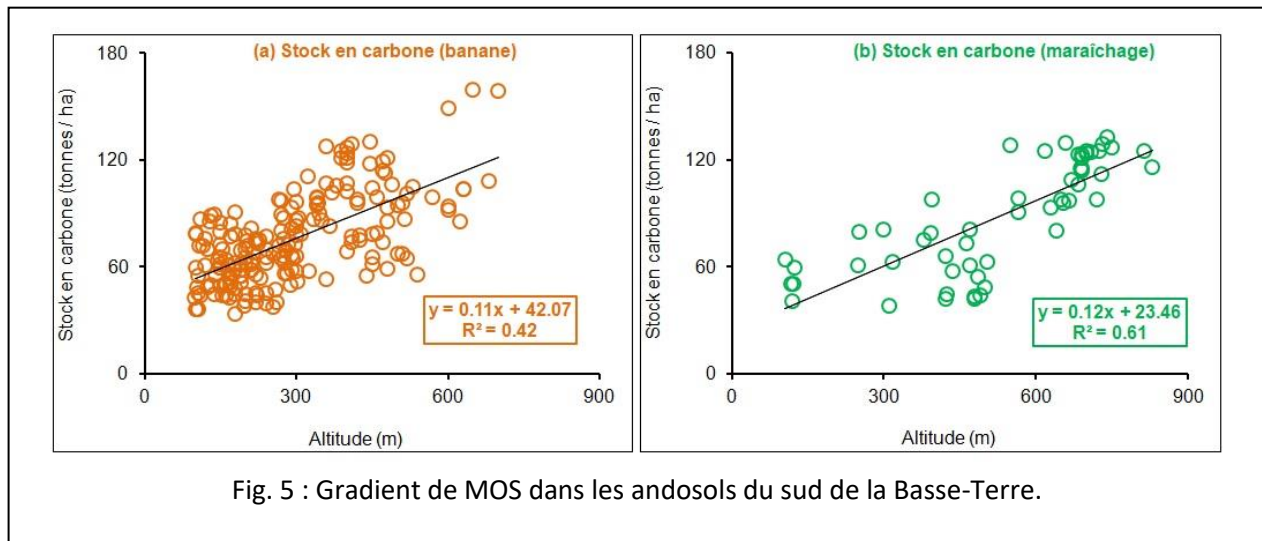
**Nous avons donc un deuxième facteur pouvant affecter le gradient de MOS : la réduction du rendement en altitude est accompagnée par la diminution de la quantité des résidus de culture,**

<sup>6</sup> Voir le No 1 de "Ce que nous savons sur" pour plus de détails sur l'impact du maraîchage sur la MOS en Guadeloupe.

et donc du carbone apporté au sol après récolte (numérateur de l'Equation 1).

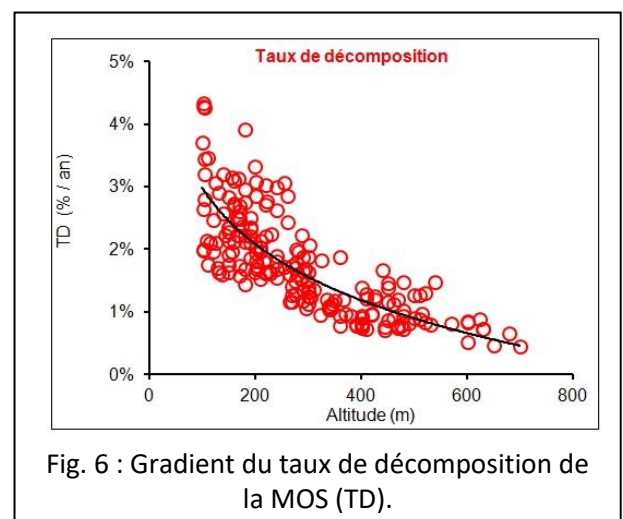
## 5- Gradient altitudinal de la MOS : effet du système de culture

Comme dans la plupart des études internationales sur le sujet, les stocks en MOS augmentent avec l'altitude dans les andosols de Guadeloupe, et cela indépendamment du système de culture installé (Fig. 5). A 100 m, les stocks estimés en carbone organique sont de 53 tonnes/ha (4.5% en MOS) sous banane et 35 tonnes/ha (2.9% en MOS) sous maraîchage. A 700 m, les valeurs sont respectivement 119 et 107 tonnes/ha (12.1% et 10.9% en MOS). Les stocks sont toujours plus faibles sous maraîchage du fait d'un travail du sol plus intensif (décomposition de MOS plus grande) et aussi d'une plus faible quantité de résidus de récolte pour les cultures annuelles (moins apport de carbone), par rapport à la banane. **Néanmoins, il est intéressant de souligner que les différences entre les deux systèmes sont plus faibles en altitude : 18 tonnes/ha à 100 m et seulement 12 tonnes/ha à 700 m. Nous reviendrons sur l'explication de ce phénomène dans l'item suivant.**



## 6- Gradient de décomposition de la MOS : sensibilité au travail du sol et au réchauffement climatique

En utilisant l'information présentée ci-dessus et en appliquant l'Equation 1, nous avons mis en évidence que le TD diminue avec l'altitude d'environ 3%/an à 100 m à 0.5%/an à 700 m (Fig. 6). Cette diminution de 600% le long du gradient est largement plus importante que la diminution du carbone apporté par les résidus de culture (46%). Cela implique que le gradient altitudinal de la MOS dans les sols du sud de la Basse-Terre (Fig. 5) est contrôlé par la diminution de sa décomposition et non par la variation du carbone apporté. C'est à dire, la





diminution du carbone apporté avec l'altitude peut nuancer le gradient de MOS mais elle ne le détermine pas.

La question qui se pose suite à la mise en évidence de la diminution du TD avec l'altitude est quel-est (quels-sont) le(s) facteur(s) qui détermine(nt) cette tendance ?

Analysons d'abord les facteurs climatiques. La diminution de la température en altitude pourrait affecter le TD par l'intermédiaire d'une réduction de l'activité microbienne du sol. Pour déterminer un possible effet de la température nous avons calculé le coefficient de température  $Q_{10}^7$ , lequel est une mesure du changement de vitesse d'un processus biologique (dans notre cas la décomposition de la MOS) face à une augmentation de  $10^\circ\text{C}$  de la température. La valeur du  $Q_{10}$  se situe entre 2 et 3 dépendant du type de processus. Dans le cas du gradient de TD observé dans notre étude la valeur de  $Q_{10}$  est de 31, une valeur donc invraisemblable pour expliquer un éventuel effet de la température. Dans la pratique cette valeur implique que la variation de TD le long du gradient altitudinal est largement supérieure à ce qu'on pourrait s'attendre si le facteur clé était la température. **La température peut donc nuancer le gradient de TD mais elle ne le détermine pas.**

En ce qui concerne un possible effet des pluies, elle pourrait affecter le TD car la disponibilité d'eau dans le sol affecte l'activité microbienne du sol. Pourtant, **le gradient des pluies va dans le sens contraire à un tel effet.** En fait, le TD est plus grand à basses altitudes (Fig. 6) où les pluies sont moins abondantes (Fig. 2).

La disponibilité de nutriments pour l'activité microbienne du sol est le deuxième type de facteur qui mérite une analyse particulière. Dans l'item 2 nous avons souligné que dans certains écosystèmes naturels la faible disponibilité de phosphore en altitude peut limiter l'activité des microorganismes décomposant la MOS. **L'information disponible dans notre base de données montre qu'aucun des nutriments (p.ex. azote, phosphore, calcium, magnésium, potassium) ne présente un gradient altitudinal, et que leurs teneurs sont similaires pour les deux systèmes de culture analysés (banane et maraîchage). Ces deux agrosystèmes sont fortement fertilisés ce qui empêche toute limitation nutritionnelle de la décomposition de la MOS.**

Le gradient altitudinal minéralogique est la seule variable qui peut expliquer la forte diminution du TD en altitude. Dans ce sens, **l'augmentation de 300% de la teneur en allophane (Fig. 3a) indique que le niveau de protection physique de la MOS s'accroît considérablement le long du gradient altitudinal en induisant une augmentation de son stock.** La moindre différence en MOS observée entre les deux systèmes de culture à haute altitude (Fig. 5) peut être donc expliquée par une plus grande résilience de la MOS vis-à-vis d'un travail du sol plus intensif en maraîchage. **C'est à dire, le carbone séquestré dans la microporosité des allophanes rend l'ensemble de la MOS moins susceptible à une décomposition rapide suivant le labour du sol.**

Concernant un éventuel effet du CC, le scénario climatique élaboré par Météo France pour la Guadeloupe montre que la température augmenterait de  $0.7^\circ\text{C}$  à l'horizon 2045. En revanche, le régime pluviométrique serait plutôt stable jusqu'à 2050-2060. Dans ce scénario

---

<sup>7</sup> Pour le détail du calcul du  $Q_{10}$  se référer à l'article Sierra J and Causeret F, 2018, Changes in soil carbon inputs and outputs along a tropical altitudinal gradient of volcanic soils under intensive agriculture. Geoderma 320: 95-104.

il n'y a pas de prédiction précise concernant le gradient thermique au sud de la Basse-Terre, et nous ne pouvons pas en conséquence réaliser des estimations sur l'impact du réchauffement climatique sur le gradient de décomposition de la MOS. Si l'augmentation de la température est similaire le long du gradient, le TD augmenterait dans la même proportion sur tout le gradient altitudinal, et le gradient actuel de TD se maintiendrait dans le temps mais avec des valeurs légèrement plus importantes. Si en revanche l'augmentation de la température est majeure dans les basses altitudes, alors le gradient de décomposition serait plus prononcé que celui observé dans notre étude. Seulement une augmentation de température beaucoup plus importante dans les hautes altitudes pourrait nuancer la tendance observée. Pourtant, le moindre effet de la température par rapport à celui de la minéralogie laisse penser que le gradient de TD pourrait diminuer mais non disparaître ni, moins encore, s'inverser.

Cela implique que les sols de basses altitudes seront toujours plus sensibles à la dégradation de la MOS, notamment en présence d'un travail du sol intensif. Dans ce cas, l'apport régulier d'amendements organiques et la réduction du travail du sol pourraient pallier une dégradation accélérée de ces sols.

## 7- Conclusions

Nous avons estimé pour la première fois le taux de décomposition *in-situ* de la MOS le long d'un gradient altitudinal. Cette évaluation nous a permis d'établir que **la résilience des sols du sud de la Basse-Terre vis-à-vis du travail du sol et du réchauffement climatique augmente avec l'altitude**, ce qui est en liaison avec l'accroissement de la protection physique de la MOS exercée par les allophanes. En fait, **il s'agit du même processus qui est à l'origine de la plus grande contamination par la chlordécone des sols à haute altitude**, ce qui montre que certaines propriétés des sols peuvent être la cause simultanée des phénomènes positifs et négatifs d'un point de vue agroenvironnemental. **Ce constat oblige à une grande vigilance lors de l'application des pratiques destinées à la levée des contraintes agronomiques afin de ne pas promouvoir l'apparition des aspects négatifs du fonctionnement du sol.**

Les résultats obtenus apportent des pistes intéressantes aussi bien pour la recherche agronomique que pour la gestion de pratiques culturales dans le gradient altitudinal du sud de la Basse-Terre. Pour la recherche, il s'agit essentiellement d'**approfondir les connaissances sur la relation entre la minéralogie et l'activité microbienne du sol**, en particulier sur la réponse de cette dernière au changement du régime thermique et de l'intensité du travail du sol. En ce qui concerne les pratiques, **la combinaison de l'apport de matière organique exogène (compost, fumier) et la réduction du travail du sol, notamment en maraîchage, sont des leviers à utiliser afin d'accroître la résilience des sols de basses altitudes.** L'amélioration des prédictions sur le réchauffement climatique en altitude devrait permettre dans un futur proche de mieux cerner l'impact de ces pratiques.