



**HAL**  
open science

# Prise en compte de l'adaptation des microorganismes du sol au changement climatique

Jorge Sierra

► **To cite this version:**

Jorge Sierra. Prise en compte de l'adaptation des microorganismes du sol au changement climatique : (Projet Climator). 2007. hal-02814071

**HAL Id: hal-02814071**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02814071>**

Submitted on 6 Jun 2020

**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.

## Projet Climator

### Prise en compte de l'adaptation des microorganismes du sol au changement climatique

Jorge Sierra

UR135 Agropédoclimatique de la zone Caraïbe

INRA Antilles-Guyane

2007

#### I- Objectif, méthodologie et hypothèses

L'objectif de ce volet est d'analyser la variation de l'activité biologique du sol en réponse au changement climatique (CC), et de proposer des modifications (ou des adaptations) aux équations décrivant cette activité dans les modèles afin de tenir compte de son éventuelle adaptation.

J'ai fait trois choix :

- i) baser l'analyse sur l'information disponible, même si les mécanismes ou les causes de l'adaptation des microorganismes ne sont pas actuellement connues (retroalimentation, facteurs limitants, etc.);
- ii) cibler sur l'effet du changement de la température. En fait, d'autres facteurs, tel que l'augmentation du CO<sub>2</sub>, ont été peu étudiés ou l'information disponible montre que son effet serait négligeable (Barnard et al., 2004).
- iii) me baser sur les équations du modèle STICS 5.0 afin d'introduire l'adaptation des microorganismes.

Concernant le point i), je n'ai pas trouvé des travaux sur l'adaptation des microorganismes au CC. J'ai donc basé l'analyse sur la comparaison des résultats obtenus sous des conditions climatiques contrastées; p.ex. tempérées vs. tropicales, intratempérées, intratropicales.

J'ai examiné quatre aspects de l'activité biologique du sol:

- i- les processus oligospécifiques, où l'activité concerne quelques espèces des microorganismes (nitrification et dénitrification);
- ii- les processus plurispécifiques, où l'activité concerne une quantité élevée des microorganismes (minéralisation de la matière organique du sol, MOS, et décomposition des résidus);
- iii- l'interaction entre processus; p.ex. minéralisation de la MOS (consommation d'oxygène) et dénitrification;
- iv- la définition de l'échelle du temps de l'adaptation.

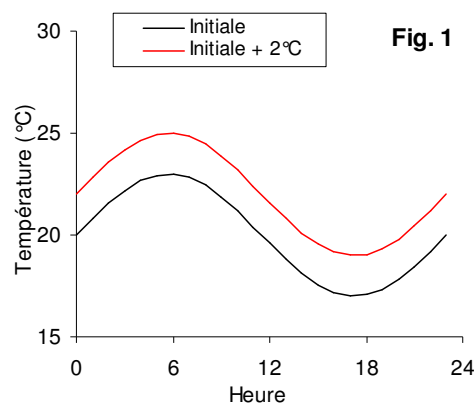
Il y a au moins deux différences importantes entre les processus oligo et plurispécifiques, ce que justifie les analyser séparément:

\* Tandis que le substrat des processus oligospécifiques est unique et homogène vis-à-vis de l'activité analysée (p.ex. ammonium pour la nitrification, nitrates pour la dénitrification), il est hétérogène dans le cas des processus plurispécifiques (p.ex. plusieurs fractions ou composés organiques dans la MOS et dans les résidus). Cela implique qu'il est plus aisé de comparer l'information issue de milieux différents (p.ex. tempéré vs. tropical) dans le cas des processus

oligospécifiques (c.a.d. le substrat ne varie pas) que dans le cas des processus plurispécifiques (c.a.d. le changement de la qualité de la MOS peut faire varier la réponse à la température).

\* Si l'on considère que la probabilité d'adaptation d'une espèce donnée (ou d'une souche?) dépend de la quantité des compétiteurs, cette probabilité serait moindre dans le cas des processus plurispécifiques car il y aurait toujours une espèce (ou une souche) "*déjà adaptée*" au nouveau environnement induit par le CC. L'hypothèse sous-jacente à cette proposition est que la réponse à la température d'un processus donné est la moyenne pondérée des réponses individuelles pour chaque situation environnementale.

Afin d'illustrer l'effet des modifications et des modifications introduites dans les équations, j'ai calculé l'activité relative lors d'un jour "moyen", avec des températures moyennes de 20°C (situation initiale) et de 22°C (simulation d'une augmentation de 2°C de la température moyenne). L'amplitude thermique journalière était fixée à 6°C (Figure 1). L'activité relative est exprimée en FT (facteur de température).



## II- Nitrification

Rappel: ce processus intéresse seulement les situations où la nitrification est partiellement limitée ou inhibée; p.ex. à cause de l'acidité du sol, dans la plupart des sols forestiers et les sols ferrallitiques des tropiques. Pour le reste, la nitrification est généralement limitée par la minéralisation et ce n'est pas nécessaire de décrire les deux processus d'une façon indépendante.

La nitrification est probablement le processus qui a le plus d'information concernant l'effet de la température. L'analyse a été basée sur les travaux de Joergensen et al. (1990) au Royaume-Uni, Myers (1975) en Australie sub-tropicale, Grundmann et al. (1995) en France métropolitaine, et les miens en Guadeloupe (Sierra and Marbán, 2000; Sierra, 2002). Ces études ont été réalisées en conditions de non limitation de substrat. Il s'agit donc des estimations de la nitrification potentielle ce qui permet la comparaison.

L'ensemble des résultats montre clairement que la nitrification présente une température optimale ( $T_{opt_{nit}}$ ) et cesse à une certaine température ( $T_{max_{nit}}$ ). La température minimale ( $T_{min_{nit}}$ ) n'est pas en général calculée et elle a été donc estimée par ajustement linéaire des résultats présentés par chaque auteur. Les résultats montrent aussi que  $T_{opt_{nit}}$  et  $T_{max_{nit}}$  varient en fonction de la température moyenne de la situation étudiée (p.ex. plus élevées dans les tropiques, intermédiaires en France métropolitaine et plus faibles au Royaume-Uni). J'ai assumé donc que ces résultats sont une preuve de l'adaptation des microorganismes de la nitrification au changement de la température.

D'ailleurs, il apparaît que l'adaptation se réalise en conservant approximativement l'activité relative; p.ex. l'activité relative FT correspondant à la température moyenne ne varie pas avec le

changement de celle-ci, même si l'activité en termes absolus peut le faire (p.ex. nitrification exprimée en  $\text{mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ).

Note: d'une façon générale, si face à une augmentation de la température la réponse ne se déplace pas vers des températures plus élevées, l'activité relative à la nouvelle température moyenne doit augmenter. Sans rentrer dans des spéculations théoriques sur l'adaptation et l'évolution des espèces, il est probable que d'autres facteurs que ceux impliqués dans le processus analysé lui-même contrôlent l'adaptation; p.ex. la disponibilité des nutriments et/ou du carbone.

Sur la base de ces observations, nous avons modifié légèrement l'équation de STICS afin de pouvoir introduire l'adaptation au changement de température:

FT nitrification = 0

FT nitrification =  $(T - T_{\text{min}_{\text{nit}}}) / (T_{\text{opt}_{\text{nit}}} - T_{\text{min}_{\text{nit}}})$

FT nitrification =  $(T - T_{\text{max}_{\text{nit}}}) / (T_{\text{opt}_{\text{nit}}} - T_{\text{max}_{\text{nit}}})$

FT nitrification = 0

si  $T \leq T_{\text{min}_{\text{nit}}}$

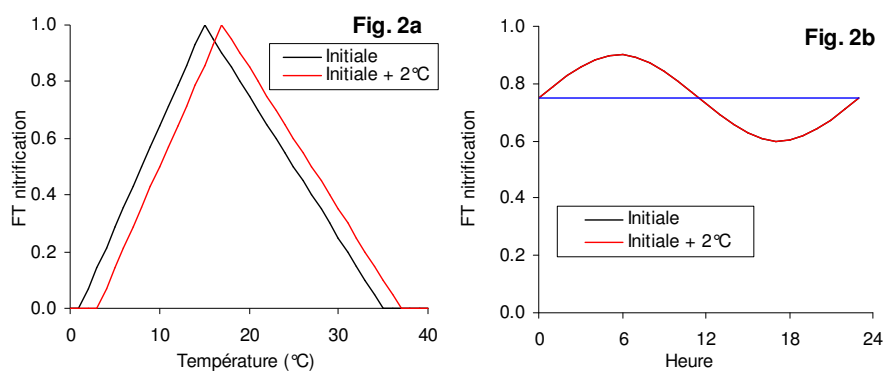
si  $T_{\text{min}_{\text{nit}}} < T \leq T_{\text{opt}_{\text{nit}}}$

si  $T_{\text{opt}_{\text{nit}}} < T < T_{\text{max}_{\text{nit}}}$

si  $T \geq T_{\text{max}_{\text{nit}}}$

où T est la température.

La Figure 2a montre le FT calculé pour une situation initiale où  $T_{\text{min}_{\text{nit}}} = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}_{\text{nit}}} = 25^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{max}_{\text{nit}}} = 35^\circ\text{C}$ . Pour la situation "initiale + 2°C" j'ai modifié de +2°C chacune de ces températures seuil. La Figure 2b montre le FT calculé pour un jour "moyen" à 20°C et à 22°C de températures moyennes. Les deux réponses sont tout à fait superposées ce que reflète l'hypothèse de non variation de la réponse relative. La ligne bleue indique le FT à la température moyenne correspondant. La symétrie de la réponse d'un côté et de l'autre de cette ligne reflète la linéarité des fonctions choisies.



Note: pour les fonctions de réponse de type linéal et exponentiel simple, la prise en compte de l'adaptation se réalise par la simple modification des températures seuil. Pour d'autres fonctions ou modèles il faudra vérifier si cela suffit pour respecter l'hypothèse de non variation de la réponse relative pour toute la gamme des températures. Cette précaution s'applique à tous les processus analysés ici.

### III- Dénitrification

Je me suis basé essentiellement sur les résultats de Powlson et al. (1988), Breuer and Butterbach-Bahl (2005) et Dorsch and Bakken (2004), lesquelles représentent une large gamme de situations climatiques. Dans l'ensemble, on retrouve le même type de tendance que pour la nitrification: la réponse se déplace en fonction de la température moyenne de la situation analysée en conservant approximativement l'activité relative.

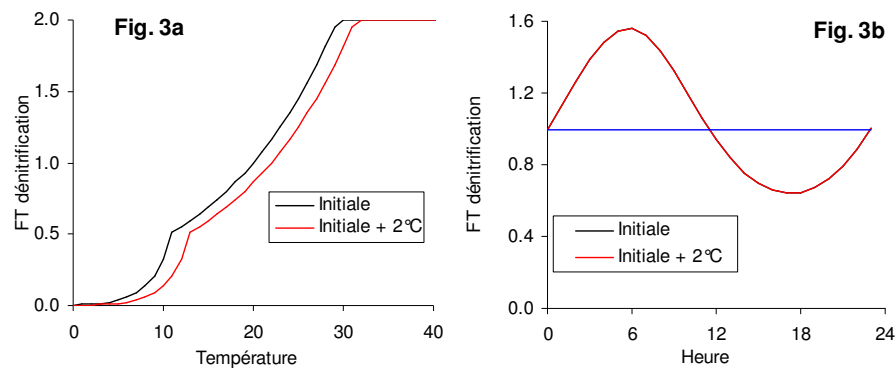
Comme pour la nitrification, j'ai modifié partialement l'équation de STICS.

$$FT \text{ dénitrification} = \exp \left\{ \left[ (T - Tref_1) \times \ln 89 \right] - (9 \times \ln 2.1) \right\} / 10 \quad \text{si } T \leq Tref_1$$

$$FT \text{ dénitrification} = \exp \left\{ \left[ (T - Tref_2) \times \ln 2.1 \right] / 10 \right\} \quad \text{si } T > Tref_1 \text{ et } FT < 2, \text{ sinon } FT = 2$$

où  $Tref_1$  et  $Tref_2$  sont les températures de référence pour chaque gamme de température: plus petite et plus grande que  $Tref_1$ . Dans la version originale:  $Tref_1 = 11^\circ\text{C}$  et  $Tref_2 = 20^\circ\text{C}$ . La prise en compte de l'adaptation se réalise comme pour la nitrification en augmentant les  $Tref$  en fonction de l'augmentation de la température moyenne.

La Figure 3a montre le FT calculé pour une situation initiale ( $Tref_i$  de la version originale) et pour la situation "initiale +  $2^\circ\text{C}$ " ( $Tref_i + 2^\circ\text{C}$ ). La Figure 3b montre le FT calculé pour un jour "moyen" avec  $20^\circ\text{C}$  et  $22^\circ\text{C}$  de températures moyennes. Les deux réponses sont tout à fait superposées ce qui reflète l'hypothèse de non variation de la réponse relative. La ligne bleue indique le FT à la température moyenne. L'asymétrie de la réponse d'un côté et de l'autre de cette ligne (p.ex. surface de réponse plus grande au-dessous de la ligne bleue) reflète la non linéarité des fonctions choisies.



#### IV- Minéralisation de la MOS et décomposition de résidus

La comparaison de différents travaux n'est pas valable pour la minéralisation car le type et la qualité de la MOS peut affecter la réponse à la température. Par exemple, comparée à la réponse observée dans les sols tempérés, celle des sols ferrallitiques de Guadeloupe est décalée vers des températures plus élevées (Sierra and Marbán, 2000). Cela n'est pas le cas de vertisols guadeloupéens (Sierra et al., 2002) ni de la minéralisation des produits organiques labiles dans les mêmes sols ferrallitiques (p.ex. boues de STEP, Sierra et al., 2001). Notre conclusion est que le décalage observé dans la minéralisation de la MO des sols ferrallitiques n'est pas dû à une adaptation des microorganismes, sinon à la présence d'une MO plus récalcitrante nécessitant d'une énergie d'activation plus importante pour être minéralisée (p.ex. protection physique par les oxydes et hydroxydes de fer et aluminium).

Note: l'effet de la qualité de la MOS sur la réponse à la température dans des sols soumis à des conditions climatiques presque identiques (p.ex. vertisols vs. ferrallitiques en Guadeloupe), met en évidence la nécessité de considérer une  $Tref$  différente pour chaque fraction organique définie dans les modèles type Century. Cette analyse sera réalisée avec les collègues d'Orléans (M. Manuel).

D'ailleurs, les travaux réalisés en Guadeloupe sur la minéralisation des résidus de culture (banane, igname, légumineuses; Motisi, 2005; Thieuleux, 2006; Ripoche, 2006) montrent que la cinétique de décomposition peut être décrite avec l'équation du module Résidus de STICS sans aucune modification de la température de référence (15°C). Ces observations vont dans le sens de l'hypothèse sur l'adaptation microbienne dans les processus plurispécifiques.

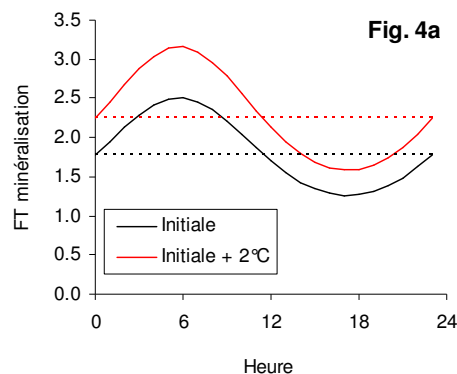
Note: une température de référence de 15°C n'a pas de sens physique dans la plupart des tropiques car les températures minimales dans le sol sont en général supérieures à cette valeur. Il s'agit donc d'une valeur arbitraire qui pourrait être modifiée en adaptant les autres paramètres de l'équation de réponse.

Sur la base de ces résultats, nous ne considérons pas, dans un premier temps, aucune adaptation pour ces processus. Cela implique que leur vitesse relative augmentera en fonction de la température. Pour illustrer cet effet, j'ai calculé le FT de la minéralisation pour des jours "moyens" avec des températures moyennes de 20°C et 22°C (Figure 4a). Les calculs ont été réalisés avec l'équation de STICS avec une  $T_{ref_{mo}}$  de 15°C:

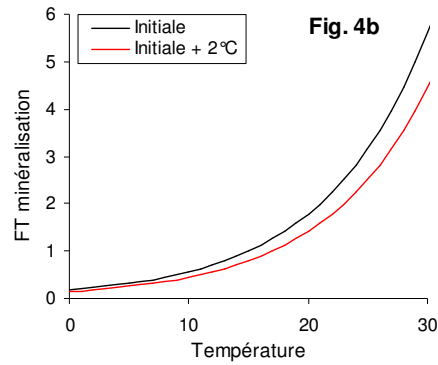
$$FT_{\text{minéralisation}} = \exp [ f_{tem_{mo}} \times (T - T_{ref_{mo}}) ]$$

où  $f_{tem_{mo}}$  est une constante égal à 0.115 (0.22 pour les sols ferrallitiques de Guadeloupe).

Les lignes pointillées indiquent le FT aux températures moyennes et l'asymétrie de la réponse reflète la non linéarité de la fonction. Pour la même raison les différences entre les deux situations sont plus importantes pour les températures élevées.



Dans l'exemple de la Figure 4a, le FT moyen journalier a augmenté de 25% pour une augmentation de 2°C de la température moyenne. Cela suggère que le fait de ne pas considérer une adaptation de la réponse de la minéralisation risque d'avoir des effets très importantes sur l'évolution des teneurs de la MOS. Je propose de tester en WP4 les deux cas, sans et avec adaptation, afin d'évaluer la sensibilité de cette évolution aux hypothèses sélectionnées. Dans ce cas, et pour STICS, il suffit de changer la  $T_{ref_{mo}}$  en fonction du changement de température. La Figure 4b montre la réponse de la minéralisation pour des  $T_{ref_{mo}}$  de 15°C et de 17°C ( $f_{tem_{mo}} = 0.115$ ). La réponse relative pour des jours "moyens" (20°C et 22°C de température moyenne) est la même dans les deux situations (non montré).



L'équation originale de STICS concernant la réponse à la température de la décomposition de résidus n'est pas bien adaptée pour introduire une variation de  $T_{ref}$ . J'ai donc modifié cette équation afin de proposer une alternative plus simple (voir l'Annexe).

## V- Interaction minéralisation de la MOS - dénitrification

Dans la plupart des modèles, la dénitrification est estimée en tenant compte la teneur en eau dans le sol. Cela représente, d'une façon indirecte, l'effet de l'eau sur la formation des régions anoxiques. Or, l'anoxie dépend aussi de la consommation d'oxygène laquelle est liée à la minéralisation de la MOS. Ainsi, la température affecte l'activité dénitrifiante et aussi le volume du sol où cette activité se développe.

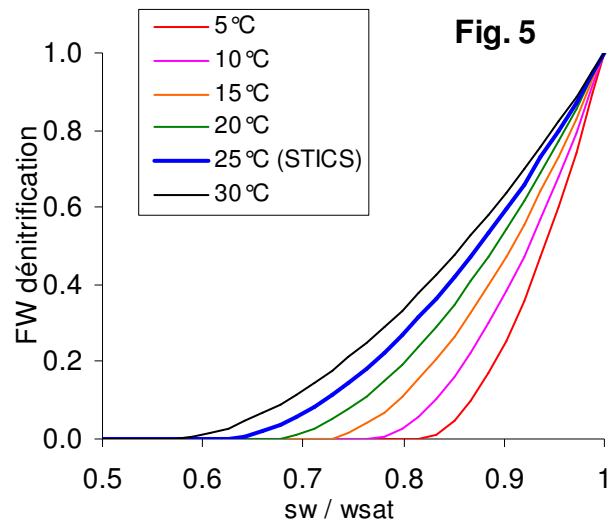
Afin de tenir compte de l'effet de la température sur l'anoxie, je propose une modification de l'équation de réponse de la dénitrification à la teneur en eau (FW). Elle est basée sur le travail de Renault and Sierra (1994). Dans le cas de STICS, la modification concerne la valeur minimale de porosité relative remplie d'eau à partir de laquelle la dénitrification démarre (la valeur actuelle est constante et égal à 0.62). L'équation est:

$$FW \text{ dénitrification} = \left\{ \left[ \frac{sw - (sw_{rmin} \times wsat)}{(1 - sw_{rmin}) \times wsat} \right]^{1.74} \right. \\ \left. \text{si } sw/wsat > sw_{rmin}, \text{ sinon } FW = 0 \right.$$

$$\text{avec } sw_{rmin} = 0.62 - \left[ \frac{(T - T_{ref_{fhum}})}{100} \right]$$

où  $sw$  est la teneur en eau volumique,  $wsat$  est la porosité total ( $1 - d_{ap}/2.66$ ), et  $sw_{rmin}$  est la teneur en eau volumique relative pour le démarrage de la dénitrification. Compte tenu que la valeur initiale de 0.62 a été prise du travail de Grundmann and Rolston (1987), et que la température dans leur expérimentation était de 25°C, j'ai considéré que celle-ci correspondait à la  $T_{ref_{fhum}}$  initiale. La variation de  $T_{ref_{fhum}}$  en réponse au CC dépendra de l'hypothèse adoptée pour la minéralisation (avec ou sans adaptation).

La Figure 5 montre l'effet de la température sur le FW de la dénitrification pour une  $T_{ref_{fhum}}$  de 25°C en fonction de la porosité relative remplie d'eau.



La pertinence de la fonction FW et des paramètres utilisés pour calculer  $sw_{rmin}$  devrait être testée en WP4, du même que l'effet d'une variation de la  $T_{ref_{hum}}$ . Une première étape serait de revenir sur les travaux utilisant l'équation initiale afin d'analyser les écarts modèle-observations. A priori ils devraient être plus importants à de faibles températures.

Note: a priori cette fonction FW pourrait s'appliquer à tous les processus aérobies et anaérobies car ils dépendent du volume anoxique (ou non anoxique!). A réfléchir. D'ailleurs, il faudra établir s'il y a d'autres d'interactions biologiques à analyser. Avec le  $CO_2$ ?

## VI- Echelle de temps de l'adaptation

Quelle est la température moyenne sur laquelle faut-il se baser afin de modifier les températures seuils ( $T_{ref}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{opt}$ ,  $T_{max}$ ) ?

Il n'y a pas d'information disponible à ce sujet. Les travaux utilisant des dispositifs artificiels pour tester l'effet du changement de la teneur en  $CO_2$  et de la température présentent des résultats contradictoires concernant les processus biologiques du sol (Schmidt et al., 2002; Barnard et al., 2004). D'ailleurs, l'installation de ces dispositifs est relativement récente et il serait probablement hâtif d'essayer d'établir une adaptation microbienne: l'erreur expérimentale serait plus grande que l'effet d'un léger changement des  $T_{ref}$ .

Breuer et al. (2005) discute la vitesse d'adaptation des dénitrifiants (rapide ou lente, sur quelle période? il ne l'ai dit pas!), mais ces résultats ne le permettent pas de faire un choix. A priori l'adaptation devrait être progressive et non brutale. Pour la modélisation, je propose de considérer la température moyenne sur 5-10 ans afin de nuancer les années chaudes ou froides.

Voici un exemple de ma proposition sur une base de 10 ans:

$$\Delta T(an\ n) = T_{moy}(an\ n-10; an\ n-1) - T_{moy}(an\ -1; an\ -10)$$

$$T_{seuil}(an\ n) = T_{seuil}(initial) + \Delta T(an\ n)$$

Cette formulation permet de conserver approximativement (en fonction des fluctuations interannuelles des températures moyennes) la différence entre la température moyenne annuelle et les  $T_{seuil}$ . Cela est nécessaire afin de ne pas provoquer des changements brutaux d'activité relative d'une année sur l'autre. En WP4 nous devrions analyser la sensibilité des processus à cette formulation, et évaluer si une période de 5-10 ans est pertinente.



## VII- Références

- Barnard et al. (2004). *Global Change Biol.* 10: 488-497.  
 Breuer and Butterbach-Bahl (2005). *Aust. J. Soil Res.* 43: 689-694.  
 Dorsch and Bakken (2004). *Eurasian Soil Sci.* S102-S106 Suppl. 1  
 Grundmann et al. (1995). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1342-1349.  
 Grundmann and Rolston (1987). *Soil Sci.* 144: 437-441.  
 Joergensen et al. (1990). *Soil Biol. Biochem.* 22: 1129-1136.  
 Motisi (2005). Rapport de Master 2.  
 Myers (1975). *Soil Biol. Biochem.* 7: 83-86.  
 Powlson et al. (1988). *Soil Biol. Biochem.* 20: 719-723.  
 Renault and Sierra (1994). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1023-1030.  
 Ripoche (2006). Rapport de Master 2.  
 Schmidt et al. (2002). *Plant Soil* 242: 93-106.  
 Sierra (2002). *Soil Biol. Biochem.* 34: 1219-1226.  
 Sierra et al. (2001). *Aust. J. Soil Res.* 39: 519-534.  
 Sierra et al. (2002). *Agrofor. Syst.* 54: 87-97.  
 Sierra and Marbán (2000). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2002-2010.  
 Thieuleux (2006). Rapport de Thèse.

## Annexe

### Décomposition de résidus

La fonction FT de STICS pour la décomposition de résidus est:

$$FT_{\text{résidus}} = [ a + b \times \exp ( c \times T / T_{\text{ref}_{\text{res}}} ) ]^d$$

où a, b, c et d sont des constantes et  $T_{\text{ref}_{\text{res}}} = 15^{\circ}\text{C}$ .

Afin d'introduire l'adaptation d'une façon simple, je propose une équation similaire à celle de FT de la minéralisation:

$$FT_{\text{résidus}} = \exp [ f_{\text{tem}_{\text{res}}} \times ( T - T_{\text{ref}_{\text{res}}} ) ]$$

où  $T_{\text{ref}_{\text{res}}} = 15^{\circ}\text{C}$  et  $f_{\text{tem}_{\text{res}}} = 0.0826$ .

La valeur de  $f_{\text{tem}_{\text{res}}}$  a été calculée par ajustement afin de minimiser les différences entre l'équation originale et celle modifiée, dans la gamme de températures 10-30°C.

La Figure 6 montre le FT calculé avec l'équation originale (température moyenne 22°C,  $T_{\text{ref}} = 17^{\circ}\text{C}$ ) et celle modifiée (même situation, plus la situation initiale avec une moyenne de 20°C et  $T_{\text{ref}} = 15^{\circ}\text{C}$ ). Comme pour les autres processus, les deux situations sont tout à fait superposés. Les différences entre les équations sont plutôt faibles ce qui implique que la proposition est raisonnable.

