



**HAL**  
open science

**Sur les possibilités de reconstitutions  
paléo-environnementales offertes par les andosols des  
hautes terres tropicales. Exemple des Nilgiri (Inde du  
Sud) On the possibilities of palaeoenvironmental  
reconstitution offered by tropical highlands andisols.  
Example of Nilgiri andisols (South India)**

Laurent Caner, G. Bourgeon

► **To cite this version:**

Laurent Caner, G. Bourgeon. Sur les possibilités de reconstitutions paléo-environnementales offertes par les andosols des hautes terres tropicales. Exemple des Nilgiri (Inde du Sud) On the possibilities of palaeoenvironmental reconstitution offered by tropical highlands andisols. Example of Nilgiri andisols (South India). Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIa, Sciences de la terre et des planètes, 2001, 333, pp.725-731. hal-00258681

**HAL Id: hal-00258681**

**<https://hal.science/hal-00258681>**

Submitted on 24 Feb 2008

**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.

*Sur les possibilités de reconstitutions paléo-environnementales offertes par les andosols des hautes terres tropicales. Exemple des Nilgiri (Inde du Sud)*

*On the possibilities of palaeoenvironmental reconstitution offered by tropical highlands andisols. Example of Nilgiri andisols (South India)*

Laurent CANER <sup>a,b</sup>, Gérard BOURGEON <sup>c</sup>

**Accepted version:** *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de la Terre et des Planètes*, **333**, 725-731

**Laurent CANER**<sup>a, b</sup>,

<sup>a</sup> Institut français de Pondichéry 11, St. Louis Street, P.B. 33, Pondicherry 605 001, India,

<sup>b</sup> Centre de Pédologie Biologique - CNRS, B.P. 5, 54501 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

**Gérard BOURGEON**<sup>c</sup>

<sup>c</sup> CIRAD-AMIS - TA 40 / 01, 34398 Montpellier Cedex 5, France

Tel : 04 67 61 71 86, Fax : 04 67 61 56 42, Courrier électronique : bourgeon@cirad.fr

## **Abstract**

**On the possibilities of palaeoenvironmental reconstitution offered by tropical highlands andisols. Example of Nilgiri andisols (South India).** An example, from South India, shows the potentialities offered by the study of high altitude non-allophanic andisols to reconstitute the local palaeoenvironmental history. In this type of soils, organic matter is stabilised in the form of organometallic complexes which migrate downwards very slowly. Compared to the broad signal recorded by peat bogs, the soil organic matter signal appears to be more site-specific that enables precise palaeoenvironmental studies. This application comes just when precise palaeoclimatic reconstitutions are necessary to build reliable climatic models.

**pedogenesis/ andisol/ carbon/ palaeoenvironment/ monsoon/ South India**

## **Résumé**

Un exemple, pris en Inde du Sud, montre les potentialités offertes par l'étude d'andosols non-allophaniques d'altitude pour reconstituer l'histoire paléo-environnementale locale. Dans ce type de sol, la matière organique est stabilisée sous forme de complexes organo-métalliques qui ne migrent que très lentement. Comparé au signal général enregistré par les tourbières, le signal retenu par la matière organique paraît beaucoup plus ponctuel et ceci permet des études paléo-environnementales plus précises. Cette application vient à un moment où des reconstitutions paléo-climatiques précises sont nécessaires pour bâtir des modèles climatiques fiables.

**pédogenèse/ andosol/ carbone/ paléoenvironnement/ mousson/ Inde du Sud**

## **Abridged English version**

### **1. Introduction**

Since 30 years, the highlands of South India have attracted a lot of attention in view to decipher regional palaeo-environmental evolution [14]. This is due to two reasons: (i) they harbour several peat bogs which constitute the major continental palaeo-environmental records in South India, and (ii) as in several other regions of the world, the vegetation at elevations above 2000 m is a forest-grassland mosaic of unclear origin.

The study of the soils from the Nilgiri Hills (or Nilgiris) (*figure 1*) has recently allowed us to identify non-allophanic andisols [5, 6]. Furthermore, isotopic investigations ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) on soil organic matter (SOM) also enabled to discuss the conclusions obtained from peat bog studies.

### **2. Main results obtained from peat bogs studies**

A few peat bogs, mainly from the central part of Nilgiris (*figure 1*), have provided organic material for both palynological and isotopic investigations. Results have been recently synthesised by Sukumar *et al* [14] and compared to the general monsoon dynamics as deduced from studies of marine sediments [16, 17]. Three periods have been considered during the last 20,000 years:

- the first period, from 20 ky to 16 ky B.P., showing a vegetation dominated by grasslands (C4 plants) and attributed to a relatively dry climate related to the weakness of the south-west monsoon;

- the second period, from 16 ky to 10 ky B.P., is marked by an expansion of forests (C3 plants) attributed to a more humid climate, the maximum of the monsoon being at 11-12 ky B.P.;
- the last period, from 10 ky to the present, is characterised by fluctuations of smaller amplitude; modern sediments also record the anthropogenic influence on vegetation.

### 3. Andisols from western Nilgiris

The western ranges of the Nilgiris, where the forest-grassland mosaic is almost preserved [3, 10], receive a mean annual rainfall ranging between 2000 and 5000 mm (mainly from south west monsoon), the mean annual temperature being 15°C.

The soils observed in these areas present surface horizons rich in organic matter above a red subsoil material; the transition is marked by a ‘*stone-line*’ (ferruginous nodules). The most humiferous soils are classified as non-allophanic andisols, and more exactly as aluandosols [11], in which andic properties are due to a large content in organometallic complexes [9] (*table*). These soils were previously classified as humiferous low activity clay soils [13, 15] due to their large contents in aluminium and iron oxides. The organic topsoil constitutes the andisol whereas the subsoil under the ‘*stone-line*’ must be considered as a palaeosol. Two representative profiles were selected for this study (*figure 1*): Nilg04 located inside a forest at a few decametres from the limit with a grassland, and Nilg16 under a recent plantation of Acacia and Eucalyptus in a grassland area [5].

### 4. Isotopic (<sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C) study of soil organic matter

<sup>14</sup>C dating and  $\delta^{13}\text{C}$  determinations were carried out on the < 50- $\mu\text{m}$  fraction in order to determine conventional <sup>14</sup>C age [1, 2, 8] and to document vegetation changes [4, 7, 12]. <sup>14</sup>C age shows a rapid increase with depth (*table*).

For both profiles, the  $\delta^{13}\text{C}$  signature of the surface horizon is in agreement with the current vegetation (forest for Nilg04 and mixed origin related to the recent tree plantation for Nilg16).  $\delta^{13}\text{C}$  values obtained on bottom horizons for both profiles indicate that SOM derives from C4 plants, whereas a mixed origin (C4 & C3) is noticed for SOM of the intermediate horizon of Nilg04.

To facilitate the comparison of our data with those obtained from peat studies [14], they have been represented on a common graph (*figure 2*), keeping in mind that the conventional <sup>14</sup>C age of SOM is not strictly equivalent to the radiocarbon age of peat.

## 5. Discussion

### 5.1. Age and origin of the organic matter of the Nilgiris andisols

Our data clearly show that:

- for Nilg16, accumulation of organic matter lasts since approximately 30 ky and took place under grassland vegetation; this situation seems to have persisted as no forest period has been recorded. However, between 50 and 60 cm, we must notice a steep increase in the mean age.
- for Nilg04, the current forest appears between 4100 and 1140 years B.P. *i.e.* undoubtedly after the maximum of the monsoon. [16].

The C4 isotopic signature of SOM of the bottom horizon of Nilg04 was not modified by 'forest organic matter' either by downward transfer (organic matter is immobilised through the formation of organometallic complexes [9]), or by *in situ* decomposition of tree roots, or by bioturbation [8].

Our data do not preclude the existence of a forest near 11 ky B.P. because no soil sample corresponds to this period, particularly for Nilg16 where the steep increase in the age can be attributed either to the large thickness of the dated horizons, or to a moderate erosion of the soil surface during profile development.

Nevertheless, the bottom horizon of Nilg04, presents a clear C4 isotopic signature and an age older than 4100 years B.P., which do not agree with the hypothesis of the presence of a well-developed forest at 11 ky BP.

### 5.2. Stability of ecological conditions in western Nilgiris since 25000 years?

Our data suggest the stability of grassland conditions since 30 ky B.P. for Nilg16 and a forest colonisation clearly later than 11 ky B.P. for Nilg04 ; they are therefore not consistent with the evolution described by Sukumar *et al.* [14] and illustrated in figure 2. How to explain these discrepancies?

On figure 2, the maximum of the forest expansion at about 11 ky B.P. is verified only on peat samples collected in the central part of the Nilgiris whereas no sample from the Upper Bhawani peat bog (the only one located in western Nilgiris, *figure 1*), corresponds to this period. By contrast, the points corresponding to the Upper Bhawani peat bog are very close to those representing the soil horizons studied in the same area.

Due to the lack of data concerning the 11 ky B.P. period, we are unable to describe precisely the evolution of the vegetation mosaic in the western Nilgiris during this period.

But, in order to support our hypothesis on its stability, we can recall that Blasco [3] attributed the difficulties of the forest expansion in the western ranges principally to ‘an excess of rainfall over a short period’ and to ‘the strength of the monsoon winds’. Accordingly, the presence of grasslands in the western Nilgiris may not be attributed to a monsoon deficit.

The monsoon oscillations, as described in several works [16, 17], are not questioned by our work. By contrast, the general correspondence (*i.e.* for the entire Nilgiris massif) between a wet period and the expansion of forests (or conversely between an arid period and their contraction) [14] is disputed.

### **5.3. Complementarity andisols/peat bogs**

Andisols, as well as peat bogs, appear as efficient tools to understand Nilgiris palaeo-environmental conditions. The complementarity between both tools must be highlighted here: if peat bogs provide an ‘average’ spatial signal (mixing of inputs by sedimentation), SOM provides a ‘punctual’ spatial signal (*i.e.* the grassland SOM is not affected by the neighbouring forest). Compared to peat and other organic deposits of the low-lying areas, the soil materials present also the advantage of a large geographical distribution. Thanks to SOM isotopic studies, it is therefore possible to understand the evolution of the vegetation for each point of a watershed [7].

## **6. Conclusions**

Two main conclusions can be drawn from this study.

- The first one is of local interest: the combination of results obtained on peat bogs [14] and on SOM studies (this work) has shown that the western part and the central part of the Nilgiris do not present the same vegetation history [14].
- The second one is of more general interest: if, as we suggested elsewhere [5, 6], similar andosolisation process took place in other tropical highlands, then a large domain of application for the same type of investigations is open to specify the evolution of palaeoclimates and of vegetation cover particularly in Africa, Madagascar, Andes, or Hawaii.

Finally, we emphasise the role of pedological investigations for a precise understanding of palaeo-environmental evolution.

## 1. Introduction

Les hautes terres du sud de l'Inde culminent à plus de 2500 m et sont principalement constituées par deux massifs de charnockite, les Nilgiri (*figure 1*) et les Palni. Elles ont été très étudiées depuis une trentaine d'années dans le cadre de reconstitutions paléo-environnementales [14], car (i) plusieurs tourbières y abritent les principales archives continentales connues dans le sud de l'Inde ; et (ii) à des altitudes supérieures à 2000 m, la végétation est constituée par une mosaïque forêt-savane. L'histoire de cette mosaïque a été débattue et, comme dans beaucoup d'autres régions du monde, l'hypothèse d'une origine anthropique des savanes a parfois été avancée. Elle est aujourd'hui abandonnée.

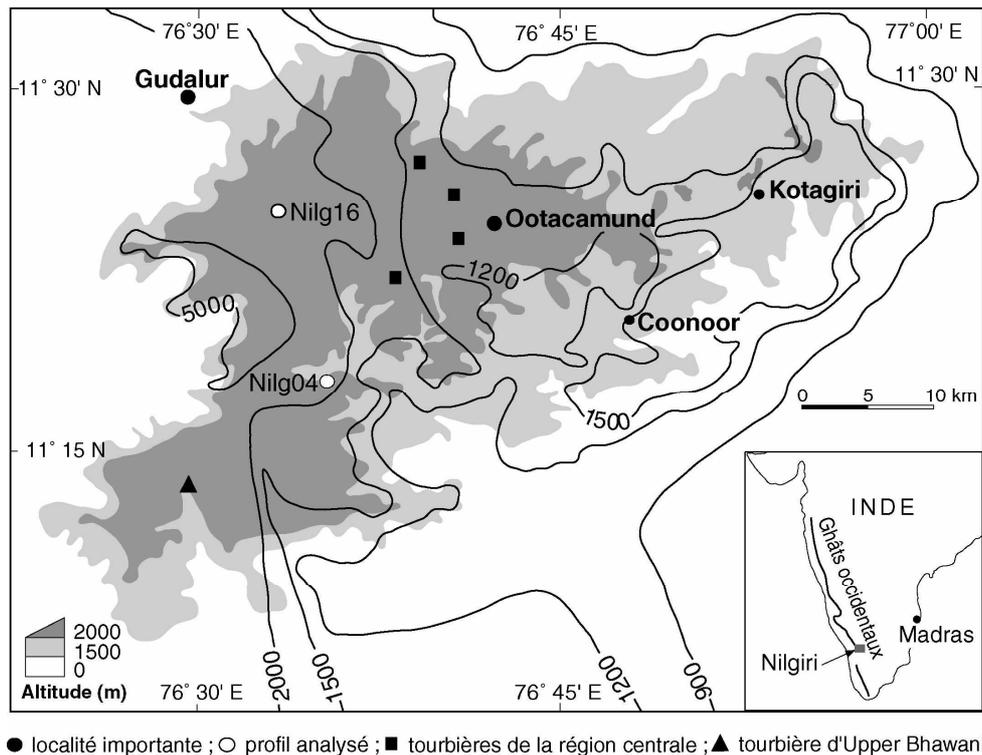
L'étude des sols du massif des Nilgiri a récemment permis d'identifier des andosols non-allophaniques [5, 6]. Au-delà de cette proposition de classification, qui est une conséquence directe des progrès réalisés ces dernières années en taxonomie pédologique, cette étude a aussi permis de préciser l'histoire paléo-environnementale du massif grâce à des mesures d'âge au radiocarbone et à des déterminations du  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique des sols.

Le but de cette note est de montrer ce qu'apporte, pour la connaissance des paléo-environnements, une étude pédologique par rapport à celle, plus traditionnelle, de tourbières. Pour cela, les sols de la zone située à l'ouest du massif des Nilgiri seront pris comme exemple et les données tirées de l'étude de leur matière organique seront comparées à celles issues de l'étude des tourbières.

## 2. Travaux antérieurs sur les tourbières

Des dépôts organiques, parfois des tourbes, se sont formés dans certains vallons du massif des Nilgiri et leur épaisseur est fréquemment de plusieurs mètres et peut même parfois atteindre près de 10 mètres. Les principales tourbières étudiées sont localisées au centre du massif (*figure 1*). De nombreuses données ont été obtenues par leurs analyses palynologiques avec ou sans datation, et détermination de la composition isotopique du carbone [14]. Ces données ont permis (i) de décrire l'évolution de la mosaïque forêt-savane du massif, et (ii) d'établir des corrélations avec la dynamique générale de la mousson [14, 17] telle qu'elle a pu être déduite de l'étude de sédiments marins [16]. Dans leur synthèse, Sukumar *et al.* [14] s'appuyant sur de nombreuses données regroupées dans un diagramme rappelé ici (*figure 2*) considèrent trois périodes au cours des vingt derniers millénaires.

- Entre 20 000 et 16 000 ans B.P., une première période où la végétation des Nilgiri était dominée par des graminées en C4 (savanes) ; cette dominance est attribuée à un climat



**Figure 1.** Hypsométrie et pluviométrie du massif des Nilgiri. Localisation des profils analysés dans cet article et tourbières étudiées par Sukumar et al. [14].

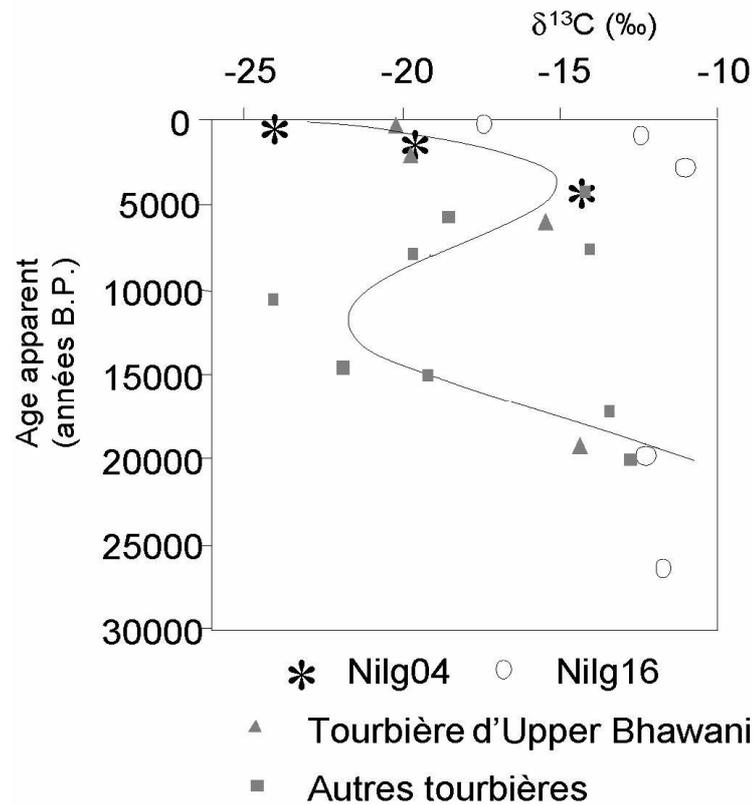
**Figure 1.** Elevation and rainfall of Nilgiri highlands. Location of the profiles analysed in this work and peat bogs studied by Sukumar et al. [14].

relativement très aride par rapport à l'actuel et correspondant au fort ralentissement de la mousson du sud-ouest enregistré par les sédiments marins.

- Une seconde période, de 16 000 à 10 000 ans B.P., marquée par une augmentation des plantes en C3 (forêts) ; cette extension des forêts est attribuée au climat devenu plus humide, le maximum de la mousson étant atteint vers 11-12 000 ans B.P.
- La période récente commençant vers 10 000 ans B.P. caractérisée par des fluctuations de plus faible amplitude ; tout d'abord un maximum relatif des plantes en C4 interprété comme un retour vers plus d'aridité entre 4 500 et 2 000 B.P., puis la tendance s'inverse avec la recrudescence de plantes en C3. Les échantillons modernes portent finalement l'empreinte d'activités humaines.

### 3. Les andosols de la partie occidentale des Nilgiri

Les zones occidentales des Nilgiri sont soumises à la mousson du sud-ouest et reçoivent une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 2000 et 5000 mm (maximum en été) ; la température moyenne annuelle y est de l'ordre de 15 °C. La mosaïque végétale est alors constituée de forêts sempervirentes d'altitude plus ou moins vallicoles, ou '*sholas*', et de



**Figure 2.**  $\delta^{13}\text{C}$  en fonction de l'âge apparent de la matière organique de la fraction  $< 50 \mu\text{m}$  des sols et des tourbières des Nilgiri, d'après Sukumar et al. [14].

**Figure 2.**  $\delta^{13}\text{C}$  versus radiocarbon date of soil organic matter in the  $< 50 \mu\text{m}$  fraction and peats of Nilgiri Hills, after Sukumar et al. [14].

savanes occupant les croupes [3, 10] ; de nombreuses plantations forestières et quelques zones de cultures viennent perturber cette distribution.

Sous '*sholas*' aussi bien que sous savane, les sols présentent des horizons de surface noirs, très humifères, superposés à un matériau pédologique de couleur rouge [5, 6] ; la transition est soulignée par une '*stone line*' (horizon de nodules ferrugineux). La '*stone line*' marque en fait une véritable discontinuité minéralogique dans le profil : la gibbsite et les oxydes de fer dominent la minéralogie du matériau rouge inférieur, alors que les horizons riches en matière organique contiennent d'importantes quantités d'associations organo-alumineuses et ferriques extractibles par l'oxalate d'ammonium et le pyrophosphate de sodium [9] (*tableau*).

Du fait du développement important des horizons humifères et du degré d'altération poussé des horizons sous-jacents, ces sols furent longtemps considérés comme des sols ferrallitiques humifères [15] ou des Ultisols humifères (*Humults*) [13]. Ceux pour lesquels le développement des horizons humifères est le plus marqué, entre 60 cm et un mètre d'épaisseur, peuvent aujourd'hui être classés parmi les andosols non-allophaniques, et plus précisément parmi les aluandosols [11], les propriétés andiques étant la conséquence de

**Tableau** Localisation des profils, teneur en complexes organo-métalliques en carbone organique, et valeurs isotopiques du carbone de la matière organique de la fraction < 50 µm

**Table** Profile location, contents in organometallic complexes, organic carbon and carbon isotopes of soil organic matter in the < 50 µm fraction

Profils	Localisation	Prof. (cm)	CoAl <sup>a</sup> g kg <sup>-1</sup>	C <sup>b</sup> g kg <sup>-1</sup>	δ <sup>13</sup> C (‰)	Δ <sup>14</sup> C <sup>c</sup> (‰)	Age moyen (années B.P.)
Nilg04	11°17'56" N	0-10	177 (41)	112	-24,2	56	153 ± 20
	76°35'57" E	15-30	148 (34)	65	-19,8	-132	1140 ± 42
	Lieu-dit	40-60	66 (15)	46	-14,4	-400	4100 ± 52
	Avalanche	65-75		22	-12,5	nd	nd
Nilg16	11°24'57" N	0-10	170 (39)	127	-17,5	87	108 ± 9
	76°34'50" E	20-35	225 (52)	90	-12,5	-98	826 ± 39
	Lieu-dit	40-50	213 (49)	68	-11,1	-295	2814 ± 42
	Mukurti dam	60-75	162 (37)	38	-12,4	-914	19715 ± 160
		75-90	159 (37)	35	-11,8	-963	26213 ± 299

<sup>a</sup> CoAl : Teneur en complexes organo-métalliques de la terre fine calculées selon la formule établie par Poulenard et Herbillon [9]. La valeur correspond à la moyenne entre les hypothèses basses et hautes et le nombre entre parenthèses à l'écart entre la moyenne et les valeurs obtenues par ces deux hypothèses.

<sup>b</sup> Carbone organique de la fraction < 50 µm

<sup>c</sup> Activités <sup>14</sup>C normalisées pour un δ<sup>13</sup>C de -25 ‰ selon la formule

Δ<sup>14</sup>C = δ<sup>14</sup>C - [(2δ<sup>13</sup>C + 50) x (1+(δ<sup>14</sup>C/1000))] avec δ<sup>14</sup>C représentant l'activité <sup>14</sup>C mesurée.

nd : Age non déterminé pour cause de teneur en C trop faible

l'abondance des complexes organo-aluminiques (*tableau*). L'ensemble humifère constitue l'andosol et le sol rouge, sous la 'stone line', doit être considéré comme un paléosol.

Pour illustrer ces sols, deux profils (*figure 1*) pour lesquels nous possédons les données les plus complètes seront pris comme exemples. Le premier, Nilg04, est situé sous forêt à quelques dizaines de mètres de la lisière avec une savane ; le second, Nilg16, est situé sous une plantation récente d'Acacia et d'Eucalyptus en zone de savane [5].

#### 4. Etude isotopique (<sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C) de la matière organique

Les deux séries de mesures, datation au <sup>14</sup>C naturel et détermination du δ<sup>13</sup>C, ont été réalisées sur la fraction < 50 µm (dite matière organique humifiée) qui représente, pour tous les horizons organiques des andosols étudiés, entre 65 et 80 % de la matière organique totale [5]. L'application de ces deux méthodes à l'étude de la matière organique des sols permet, en milieu intertropical, de connaître l'évolution locale de la végétation au cours des derniers millénaires [4, 7, 12].

- La mesure du <sup>14</sup>C a permis d'estimer un âge moyen [2, 8] qui résulte de l'activité <sup>14</sup>C résiduelle des multiples sources qui contribuent à former la matière organique d'un horizon. Les valeurs obtenues montrent (*tableau*) une augmentation rapide de l'âge moyen de la

matière organique avec la profondeur. Les horizons de surface ont des valeurs  $\Delta^{14}\text{C}$  positives qui rendent compte d'une évidente contribution du  $^{14}\text{C}$  produit par l'explosion des bombes atomiques dans l'atmosphère. Elles indiquent donc un turnover rapide des matières organiques. En supposant que les âges de ces matières organiques suivent une distribution exponentielle, formant un mélange parfait, un modèle de calcul [1] leur attribue un âge moyen (ou temps moyen de résidence) de 108 et 153 ans à Nilg16 et Nilg04 respectivement.

- Le  $\delta^{13}\text{C}$  indique le type de végétation (C3 ou C4) dont la matière organique du sol est issue [4]. Pour les deux sols étudiés, les valeurs du  $\delta^{13}\text{C}$  des horizons de surface reflètent la végétation actuelle : forêt pour le profil Nilg04 et origine mixte pour le profil Nilg16 où la plantation d'arbres en C3 est récente. La matière organique des horizons organiques les plus profonds dérive, pour les deux profils, de plantes en C4 (savanes). Le  $\delta^{13}\text{C}$  de la matière organique de l'horizon intermédiaire (15-30 cm) du profil Nilg04 indique une origine mixte.

Pour faciliter la comparaison de nos données avec celles obtenues par l'étude des tourbières [14], nous les avons regroupées sur le même diagramme (*figure 2*) tout en étant bien conscients que l'âge moyen de la matière organique d'un horizon de sol n'est pas strictement de même nature que l'âge apparent d'une tourbe.

## 5. Interprétations et discussion

### 5.1. Age et origine de la matière organique des andosols des Nilgiri

L'interprétation immédiate que l'on peut faire de ces données tient en deux points principaux :

- à Nilg16, l'accumulation de matière organique dure depuis 30 000 ans B.P. ; elle a été le fait d'une végétation savanicole et cette situation semble perdurer puisque l'on n'enregistre aucun épisode forestier au niveau du profil qui montre cependant, notons le, une augmentation particulièrement brutale de l'âge moyen entre 50 et 60 cm ;
- à Nilg04, l'installation de la forêt actuelle se situe entre 4 100 et 1 140 B.P., donc postérieurement au maximum humide de 11 000 B.P.

La signature isotopique de l'horizon de profondeur du profil Nilg04 héritée de la savane n'a en outre pas été modifiée :

- soit par d'éventuels transferts de matière organique en provenance des litières forestières ; il convient donc ici d'insister sur stabilisation de la matière organique engagée dans les complexes organo-métalliques (notamment organo-aluminiques, *tableau*) qui limite les transferts organiques verticaux [9],

- soit encore par l'apport, en profondeur, de matière organique issue de la décomposition *in situ* des racines de la végétation forestière ou de la bioturbation par la pédofaune ; l'apport résultant de la décomposition d'un réseau racinaire forestier développé et de la bioturbation qui sont des processus expliquant parfois [8] le brouillage des signatures isotopiques, n'a donc pas joué ici.

Nos données ne permettent pas d'écarter définitivement l'hypothèse d'un épisode forestier vers 11 000 B.P., car nous n'avons pas d'échantillon correspondant précisément à cette date, notamment pour Nilg16 où l'augmentation rapide de l'âge avec la profondeur peut être dû à la trop grande épaisseur (10-15 cm) des horizons datés, mais aussi à une troncature du profil par érosion.

A Nilg04, l'horizon de profondeur (65-75 cm) possède néanmoins une signature isotopique C4 nette et un âge apparent supérieur à 4 100 B.P. rendant peu probable la présence d'une forêt bien développée vers 11 000 B.P.

## **5.2. Stabilité des conditions écologiques à l'ouest des Nilgiri depuis 25 000 ans ?**

Nos résultats semblent donc indiquer une relative stabilité de la mosaïque végétale dans la partie ouest des Nilgiri avec notamment des zones de savanes ayant existé depuis 30 000 ans (Nilg16). Quand une colonisation forestière est enregistrée (Nilg04), elle semble postérieure au maximum d'humidité relevé vers 11 000 B.P. par de nombreux auteurs, et la forêt n'a pas ensuite régressé à cet endroit. Comment expliquer cette situation originale par rapport à la tendance générale déduite de l'étude de cinq tourbières [14] ? En examinant (*figure 2*) les points représentant la tourbière d'Upper Bhawani, seule tourbière étudiée située dans la zone occidentale des Nilgiri (*figure 1*), il est aisé de constater qu'aucun ne correspond à la période 16 000 - 8 000 B.P. (lacune stratigraphique ?). Le maximum d'extension des forêts vers 11 000 B.P. n'est donc attesté que par les tourbières provenant du centre des Nilgiri. En revanche, les points représentant la tourbière d'Upper Bhawani ont des positions très voisines de celles des horizons pédologiques que nous avons étudiés à Nilg04 et Nilg16. Pour conclure définitivement sur l'évolution de la couverture végétale à l'ouest du massif pendant le maximum de la mousson vers 11 000 B.P., il nous manque les données concernant un horizon dont l'âge moyen correspondrait à cet épisode. Pour conforter par un argument écologique la stabilité de la mosaïque végétale dans cette partie du massif, remarquons avec Blasco [3], que les difficultés actuelles que rencontrent les ligneux pour s'y développer sont certainement principalement dues à 'un excès pluviométrique concentré sur une courte période' et à 'la

violence des vents qui l'accompagnent'. Selon cette explication, la présence d'une savane dans cette zone ne doit donc pas être attribuée à un minimum relatif ou absolu de la mousson d'été. Les oscillations de la mousson telles qu'elles ont été décrites [16, 17] ne sont pas remises en cause ici. En revanche, la validation à l'ensemble des Nilgiri de la correspondance entre une phase humide et l'extension de la forêt ou, inversement entre une phase aride et sa rétraction [14] est contestée.

### 5.3. Complémentarité andosols / tourbières

Les andosols non allophaniques riches en matière organique des Nilgiri constituent donc, à l'instar des tourbières voisines, des enregistreurs efficaces des conditions paléo-environnementales. Le signal 'sol' est cependant moins riche que le signal 'tourbière' et il n'est pas question de l'utiliser dans la reconstitution des biomes. La complémentarité entre les deux types d'enregistrements doit être soulignée : si la tourbière fournit un signal spatial 'lissé' (par le mélange d'apports lors de la sédimentation), la matière organique du sol fournit un signal spatial 'ponctuel' (le sol de savane n'est pas perturbé par la forêt voisine et les sols livrent une matière organique qui n'a que peu ou pas migré dans le paysage). Par rapport aux tourbes et autres dépôts organiques des dépressions, les matériaux pédologiques présentent bien évidemment l'avantage d'une plus grande extension spatiale ; grâce à l'étude des sols, il est possible de connaître l'évolution de la végétation en chaque point d'un versant [7] et c'est bien ce qui nous a permis de remettre en cause le modèle général tiré de l'étude des tourbières.

## 6. Conclusion et perspectives

Les résultats présentés dans cette note sont importants à deux titres :

- l'association des résultats obtenus sur les tourbières [14] et sur la matière organique des sols (cette étude) montre que la partie occidentale des Nilgiri n'a pas connu la même succession d'épisodes savane / forêt / savane que celle décrite au centre du massif par l'étude des seules tourbières [14]. Les savanes présentes sur ces versants ont une origine ancienne (jusqu'à 26000 ans B.P.) et leur présence semble entretenue par des conditions environnementales locales malgré une pluviosité *a priori* favorable à l'expansion des forêts.
- sur un plan paléoécologique, si comme nous l'avons supposé ailleurs [6], le type d'andosolisation identifié sur les Nilgiri a concerné d'autres hautes terres tropicales, c'est un domaine d'application important et nouveau qui s'ouvre aux pédologues pour participer à l'effort de compréhension de l'évolution des paléoclimats et des couvertures végétales de ces régions, notamment en Afrique, à Madagascar, dans les Andes et à Hawaï.

**Remerciements.** Les auteurs remercient E. Schouller (CPB, Nancy) pour les datations au  $^{14}\text{C}$ , C. France-Lanord (CRPG, Nancy) pour les déterminations du  $\delta^{13}\text{C}$ , ainsi que A.J. Herbillon, B. Guillet et J.-P. Pascal pour leurs remarques constructives.

## Références

- [1] Balesdent J., The turnover of soil organic fractions estimated by radiocarbon dating. *The Science of Total Environment* 62 (1987) 405-408.
- [2] Balesdent J., Guillet B., Les datations par le  $^{14}\text{C}$  des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques, *Science du Sol* 2 (1982) 93-111.
- [3] Blasco F., Montagnes du Sud de l'Inde : forêts, savanes, écologie, Travaux de la Section Scientifique et Technique N° 10, Institut Français de Pondichéry, Pondichéry, (1971), 436 p.
- [4] Boutton T.W., Archer S.R., Midwood A.J., Zitzer S.F., Bol R.,  $\delta^{13}\text{C}$  values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem, *Geoderma* 82 (1998) 5-41.
- [5] Caner L., Les sols humifères des "Hautes Terres" du massif des Nilgiri en Inde du Sud. Formation d'Andosols sur une ancienne couverture ferrallitique en relation avec les évolutions climatiques des derniers millénaires, thèse, université de Nancy 1, (2000), 254 p.
- [6] Caner L., Bourgeon G., Toutain F., Herbillon A.J., Characteristics of non-allophanic andisols derived from low activity clay regoliths in Nilgiri Hills (Southern India), *Eur. J. Soil Sci.* 51 (2000) 353-363.
- [7] Guillet B., Faivre P., Mariotti A., Khobzi J., The  $^{14}\text{C}$  dates and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of soil organic matter as a mean of studying the past vegetation in intertropical regions: example from Colombia (South America), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 65 (1988) 51-58.
- [8] Guillet B., L'abondance naturelle des isotopes du carbone comme moyen d'étude de l'âge, du renouvellement et de l'origine des matières organiques des sols, in : Bonneau M., Souchier B., (Eds.) *Pédologie 2, constituants et propriétés du sol*, Masson, 1994, pp. 297-315.

- [9] Poulénard J., Herbillon A.J., Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. *C. R. Acad. Sci. Paris, série Ila* 331 (2000) 651–657.
- [10] Prabhakar P., Pascal J.-P., Nilgiri Biosphere Reserve Area. Vegetation and Land Use (3 maps at 1:100000). Centre for Ecological Science (Indian Institute of Science, Bangalore) and French Institute of Pondicherry, Pondichéry, 1996.
- [11] Quantin P., Andosols et Vitrosols, in : Baize D., Girard M.-C. (Eds.), *Référentiel Pédologique*, Afes/Inra éditions, 1995, pp. 85-93
- [12] Schwartz D., Mariotti A., Lanfranchi R., Guillet B.,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the Congo, *Geoderma* 39 (1986) 97-103
- [13] Sehgal J.L., Natarajan A., Reddy P.S.A., Dhanapalan Mosi A., Tamil Nadu Soils, National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning in co-operation with Department of Agriculture of Tamil Nadu, Bangalore, 1996.
- [14] Sukumar R., Ramesh R., Pant R.K., Rajagopalan G., A  $\delta^{13}\text{C}$  record of late quaternary climate change from tropical peats in southern India, *Nature* 364 (1993) 703-706.
- [15] Troy J.-P., Legris P., Souchier B., Aspects d'écologie globale dans les montagnes des Palni et des Nilgiri (Inde du Sud), *Bull. Ecologie* 8 (1977) 151-172.
- [16] Van Campo E., Monsoon fluctuations in two 20,000-Yr B.P. oxygen isotope/pollen records of Southwest India, *Quaternary Research* 26 (1986) 376-388.
- [17] Wasson R.J., The Asian monsoon during the late Quaternary: a test of orbital forcing and palaeoanalogue forecasting, in : Wadia S, Korisettar R., Kale V.S. (Eds.), *Quaternary environments and geoarchaeology of India*, *Geol. Soc. India Memoir* 32 1995, pp. 22-35.