Geo-Eco-Trop, 2003, 27, 1-2: 1- 8

L'utilisation du sol, l'hydrologie et la désertification au Tigré, Ethiopie, depuis la fin du Pléistocène

Land use, hydrology and desertification in Tigray, Ethiopia, since late Pleistocene times

Jan MOEYERSONS[1], Jan NYSSEN[2,3], Jean POESEN[3], Jozef DECKERS[4], MITIKU HAILE[2], KABETO KURKURA[5] ,Gerard GOVERS[3], Katrien DESCHEEMAEKER[4] & Nigussie HAREGEWEYN[2,3]

Abstract: We mapped in Tigray, northern Ethiopia, numerous river tufa dams, spring tufas and old landslides, indicating high groundwaters as early as 15,000 BP. This is four to five thousand years before the first manifestations of post-LGM wet conditions in the adjacent lower-lying areas. These wet conditions in the highlands lasted for at least 10,000 years. Tufa build-up and wet conditions gradually came to an end since 5,000 BP. There is no evidence that this change should be a nature-driven climatic oscillation. Instead, it is argued that it concerns a phase of deforestation-driven land degradation. It culminates in present-day desertification, characterized by important erosion and especially gully incision, leading to important drops of valley groundwaters. Although intensifying during dryer spells, gullying mainly seems to result from human pressure on the environment. Checkdams, stone bunds, exclosures and construction of small reservoirs are promising to combat desertification and to make agriculture sustainable.

Key words : Soil – Hydrology – Desertification – Tigray - Ethiopia

Resumé: Au Tigré, dans le Nord de l'Ethiopie, de nombreux barrages de tufs calcaires, des travertins de source et des glissements de terrain témoignent de nappes d'eau élevées à 15.000 BP ce qui est quatre à cinq mille ans avant les premières manifestations d'humidité post-glaciaire dans les régions plus basses avoisinantes. Ces conditions humides ont persisté pour au moins dix mille ans. Le dépôt de calcaire secondaire et les conditions humides s'arrêtent progressivement à partir de 5.000 BP. L'évidence veut qu'il s'agirait d'un changement purement climatique mais il semble plus évident que le déboisement soit la cause primordiale. Aujourd'hui, la phase de dégradation culmine dans une désertification caractérisée par des érosions intenses, très spécialement le ravinement qui cause une chute des eaux souterraines dans les vallées. Nos études indiquent la pression humaine sur le paysage comme première cause du ravinement. Des barrages de contrôle, des murailles en pierres, les terres en défens et de petits réservoirs sont prometteurs dans la lutte contre la désertification et pour une agriculture durable.

Mots-clés : Sol – Hydrologie – Désertification – Tigré - Ethiopie

INTRODUCTION

Cette étude veut mettre en évidence le rôle de l'homme dans la dégradation environnementale qui, depuis 5.000 BP, affecte le Tigré dans le Nord de l'Ethiopie et qui culmine de nos jours par une désertification (UNEP, 1994). La région du Tigré se prête parfaitement à l'étude de l'influence humaine puisque les phénomènes de désertification qui affectent la région sont difficiles à expliquer par l'unique influence du climat. En fait, les données météorologiques montrent clairement que les hautes terres de l'Afrique de l'Est connaissent des précipitations annuelles assez constantes depuis le début du 20e siècle. Les données montrent que la région n'a jamais été très menacée par les sécheresses qui, a maintes reprises depuis 1970, ont affecté le Sahel, situé à la même latitude que

[1] Economie agricole et forestière, Musée Royal de l'Afrique Centrale, B-3080 Tervuren, Belgique
[2] Dept. Land Res. Manag. & Environm. Protection, Mekelle University, P.O.Box 231, Mekelle, Ethiopia
[3] Lab. Experim. Geomorphology, K.U. Leuven, Redingenstraat 16, B - 3000 Leuven, Belgium
[4] Inst. Land and Water Manag. K.U. Leuven, Vital Decosterstraat 102, B - 3000 Leuven, Belgium
[5] Dept. Engin. Geol., Mekelle University, P.O.Box 231, Mekelle, Ethiopia

le Tigré (HULME 1996). Les précipitations annuelles dans le Nord de l'Ethiopie n'ont jamais chuté de plus de 8% en dessous de la moyenne à long terme de la région (SELESHI & DEMAREE 1998). Les irrégularités croissantes (NYSSEN *et al.* 2003, sous presse) dans la distribution saisonnière des précipitations sont incapables d'expliquer l'intensité de la désertification actuelle, qui s'exprime dans le paysage par une chute importante des nappes d'eau dans beaucoup de vallées et par des taux élevés d' érosion (NYSSEN 2001).

Cet article (1) identifie, sur base des données locales, les conditions environnementales qui existaient dans les hautes terres de l'Ethiopie depuis la fin du Pléistocène, (2) identifie les circonstances de la déstabilisation de cette situation d'équilibre écologique naturel, (3) met en évidence comment cette déstabilisation pouvait culminer dans la désertification actuelle et (4) étudie les effets des actions humaines pour remédier à la situation.

MATERIAUX ET METHODES

La région étudiée

La région d'études (Fig. 1) de ± 200 km^2 est centrée autour du village de Hagere Selam, 50 km à l'ouest de la ville de Mekelle, la capitale de la province du Tigré. La moyenne à long terme des précipitations annuelles monte à 772 mm. Ces précipitations sont essentiellement concentrées entre juin et septembre (NYSSEN *et al.* sous presse). L'évaporation dépasse les 1.800 - 2.000 mm/an (GRIFFITHTS, 1972) et la proportion des précipitations annuelles sur l'évapotranspiration potentielle tombe en dessous 0.65. Ceci signifie que la dégradation des terres se qualifie comme "désertification" (UNEP, 1994).

La géologie (BEYTH, 1972) comprend des formations subhorizontales de roches sédimentaires et volcaniques. Le grès d'Adigrat affleure dans le fond des vallées les plus profondes, tandis que la plupart des bords de vallée exposent la formation marine des calcaires d'Antalo, qui connaît une puissance de 700 m dans la région. Elle peut être subdivisée en cinq unités, dont deux bancs de puissance décamétrique, solides et peu ou pas fissurés, agissent comme des aquicludes. Les forêts de Hechi et de May Ba'ati profitent de l'affleurement des deux nappes aquifères perchées. Le calcaire d'Antalo est couvert d'un banc de grès d'Amba Aradam, épais de ± 50 m, datant du Crétacé, et deux séries de basaltes et trachy basaltes du Tertiaire, séparés par des assises lacustres silicifiées et fossilifères.

Cette région, originellement plate ou ondulante, a connu quelque 2.000 m de surélévation tectonique depuis le Tertiaire et, par la suite de cette baisse de son niveau de base, a été incisée et transformée en région de plateaux de montagne. La région étudiée connaît des dénivellations de 1000 m sur une distance de quelques kilomètres. Hagere Selam, la capitale du district, se situe à une altitude de 2650 m. Des abrupts de pente, des replats et des mesas reflètent la structure géologique de couches horizontales à résistance différentielle.

Les basaltes portent des toposéquences Luvisol-Regosol-Cambisol-Vertisol tandis que des Régosols calcareux, des Cambisols et des Calcisols se sont développés sur les calcaires (NAUDTS, 2002). Les sols basaltiques ont une grande C.E.C., possèdent les structures typiques des sols argileux gonflants, disposent d'une capacité excellente de rétention des eaux et sont généralement assez fertiles. Les sols sur calcaires connaissent des problèmes de dessiccation et la présence d'horizons pétrocalciques souvent rend leur labour difficile.

L'effet de la désertification se manifeste sur deux plans. Il y a d'abord une baisse généralisée depuis les années 50 des nappes phréatiques dans les vallées. Celle-ci ne correspond pas à une diminution des précipitations annuelles mais est commandée par le ravinement (VEYRET - PICOT *et al.* 2002) (Fig. 2). Ensuite, les hauts plateaux de l'Ethiopie subissent des érosions importantes (SOIL CONSERVATION RESEARCH PROGRAMME 2000). L'exportation de sédiments par unité de surface est importante dans les petits bassins (Fig. 3). En plus, les érosions affectent généralement les horizons pédologiques supérieurs, qui sont les plus humifères et les plus fertiles.

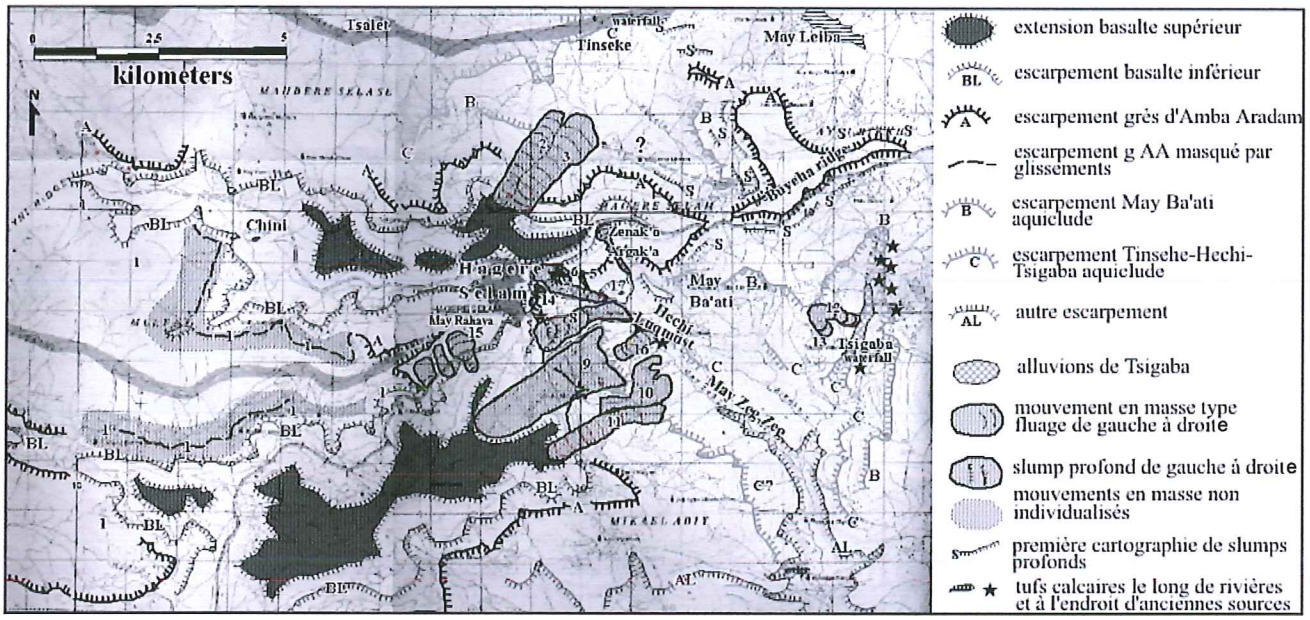

Fig. 1: carte géomorphologique de la région autour de Hagere Selam

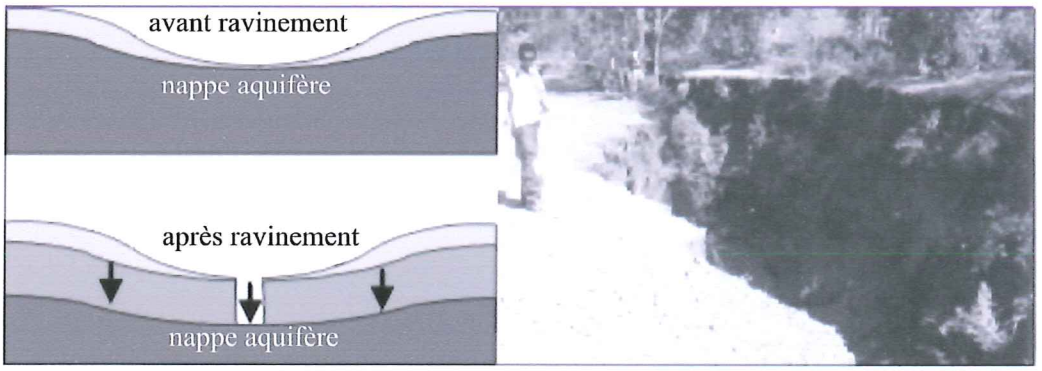

Fig. 2: à gauche: représentation schématique de la baisse des eaux en fonction du ravinement.
à droite : la ravine de Dingilet; la vallée fut incisée et marécageuse avant 1954.

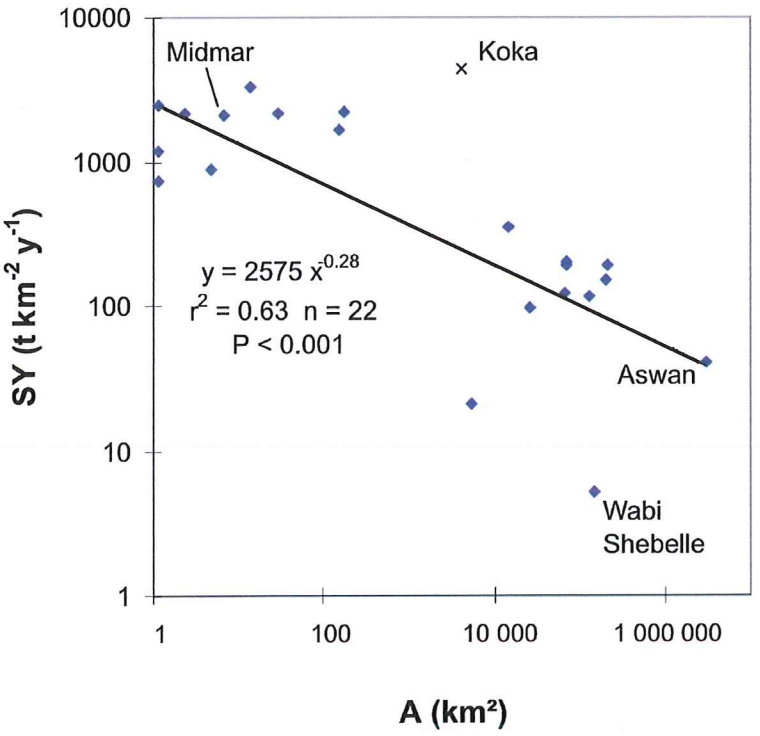

Fig. 3: pertes des terres par unité de surface (SY) contre surface drainée (A)
Données pour les hautes terres d'Ethiopie (NYSSEN & al. 2003).

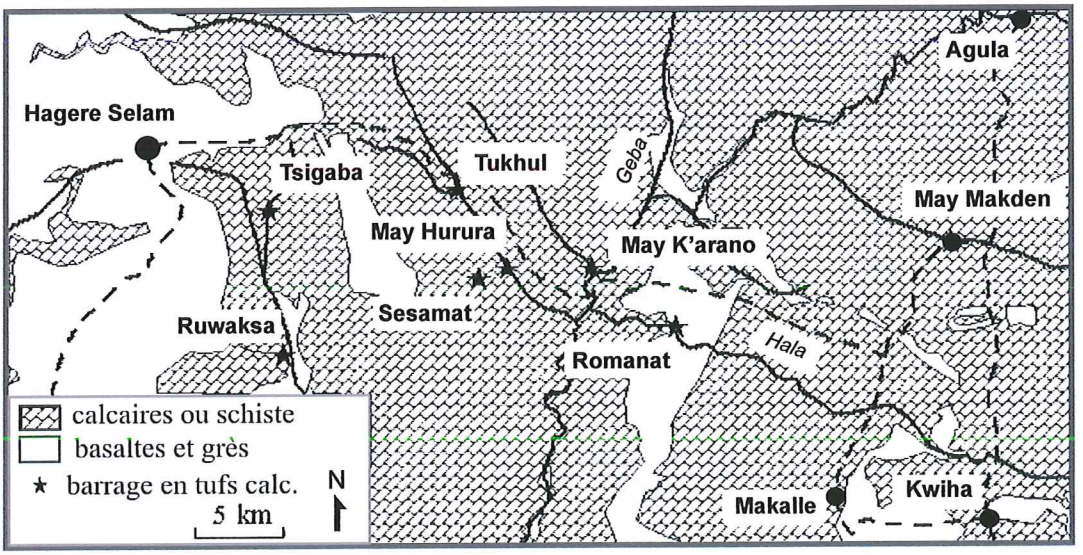

Fig. 4: Distribution des barrages de rivière en tufs calcaires entre Mekelle et Hagere Selam (NYSSEN 2001)
La plupart des barrages a été cartographiée pour la première fois durant cette période.

L'effet de la désertification se manifeste sur deux plans. Il y a d'abord une baisse généralisée depuis les années 50 des nappes phréatiques dans les vallées. Celle-ci ne correspond pas à une diminution des précipitations annuelles mais est commandée par le ravinement (VEYRET - PICOT *et al.* 2002) (Fig. 2). Ensuite, les hauts plateaux de l'Ethiopie subissent des érosions importantes (SOIL CONSERVATION RESEARCH PROGRAMME 2000). L'exportation de sédiments par unité de surface est importante dans les petits bassins (Fig. 3). En plus, les érosions affectent généralement les horizons pédologiques supérieurs, qui sont les plus humifères et les plus fertiles.

Méthodes de travail

Cette étude s'appuie sur plusieurs techniques et documents, fréquemment utilisés en sciences de la terre. Les cartes topographiques à l'échelle de 1 :50.000 (ETHIOPIAN MAPPING AUTHORITY 1996) et un MDE (NYSSEN 1995) forment la base d'un SIG dans lequel la cartographie géomorphologique, géologique et pédologique ont été intégrés, soit manuellement, soit à l'aide de données SPG. Les photos aériennes (1:50,000 noir et blanc) ont été utilisées interactivement pendant le processus de cartographie.

La recherche stratigraphique du Quaternaire s'appuie sur les méthodes 14C et U/Th de datation absolue, sur la palynologie, sur l'étude des phytolithes, des recherches géotechniques et sur des analyses pédologiques en laboratoire.

La recherche sur des parcelles expérimentales concerne la perte des terres par le ruissellement et par le labour ; elle aborde aussi la productivité en fonction des structures de conservation de sol, de la pierrosité des champs et de l'utilisation de la charrue. Un théodolite laser station totale a été utilisé pour mesurer la vitesse de troncature du sol et du phénomène de la reptation.

La méthode "HAGETIM" (VEYRET-PICOT *et al.* 2001) (Historical Assessment of Gully Erosion Through Interviews and Monitoring) a été développée. Il s'agit d'une combinaison de mensurations annuelles des paramètres topographiques des ravines et d'interrogations des gens, permettant la reconstitution du développement des ravins depuis plusieurs décennies.

L'EVOLUTION ENVIRONNEMENTALE DANS LE TEMPS

Des conditions humides à la fin du Pléistocène et à l'Holocène

La carte géomorphologique (Fig. 1) contient trois types de phénomènes-clefs dans l'interprétation des paléoconditions environnementales: (1) des barrages de rivière en tufs calcaires, devenus inactifs, (2) des tufs de source (Fig. 1) et (3) des mouvements en masse anciens(Fig. 1) (NYSSEN *et al.* 2002a; MOEYERSONS *et al.* sous presse). Des datations U/Th et 14C indiquent (NYSSEN *et al.* 2002b) que le barrage de Tsigaba et d'autres barrages dans la région étudiée (Fig. 4) se sont développés entre >13,000 BP et ± 3,000 BP; Les sources fossiles et les mouvements en masse datent également de cette période. L'ensemble des données permet de caractériser un paléoenvironnement humide par (1) des nappes d'eau perchées, plus épaisses et plus étendues qu'aujourd'hui; (2) des eaux de percolation enrichies en carbone par la végétation et/ou des horizons pédologiques humifères; (3) des sources plus nombreuses qu'à l'heure actuelle et coulant durant une plus longue période de l'année; (4) le développement de barrages en tufs calcaires avec des lacs qui occasionnaient des hausses secondaires des nappes aquifères vers l'amont; (5) des glissements de terrain actifs et des mouvements en masse lents et profonds.

La déstabilisation écologique depuis ± 3000 BP

Des changements radicaux ont affecté le paysage à partir de ± 3,000 BP. A Tsigaba (Fig. 4), le développement du barrage en tufs calcaires se termina avec le début d'érosions intenses. Dans le colmatage colluvionaire en amont du barrage se dessinent des multiples feux concentrés et plusieurs niveaux de feux de brousse. Les phytolithes sont constitués pour 74% de pièces de

Monocotylédones, tandis que dans les niveaux inférieurs, datant de la période du développement du barrage, 91% des phytolithes proviennent de Dicotylédones. Ceci indique que la période a vu une transition d'un paysage fortement boisé vers un paysage ouvert, enherbé avec, peut-être, les premières céréales cultivées. Derrière le barrage de Tukhul, l'ancien lac est rempli de colluvions contenant des strates de cendres et des couches cendreuses. Les Monocotylédones prédominent dans l'ensemble des phytolithes des niveaux supérieurs. L'explication la plus probable de l'arrêt du développement des barrages en tufs calcaires dans la région est celle, également adoptée en Europe (FORD & PEDLEY, 1996). La réduction du couvert forestier a engendré des érosions, qui, à leur tour, ont causé une augmentation des turbidités dans les eaux de rivière, ce qui a empêché la photosynthèse des mousses et lichens et, par conséquent, leur capacité de faire précipiter les calcaires dissous dans l'eau. Il semble donc que la cause réelle de la déstabilisation des conditions humides est un recul de la forêt.

Dans cette optique, il devient crucial de savoir à quelle cause attribuer ce retrait. L'ouverture et la disparition de la forêt préhistorique se fait souvent en phases, visibles sur des étendues régionales. Ceci pourrait conduire à considérer une détérioration du climat comme la cause ultime du recul de la forêt. Mais cette considération est invalide. La grande phase du retrait de la forêt vers 3000 BP a également été observée dans des lieux très éloignés de l'Ethiopie comme le Rwanda et le Cameroun. Mais dans ces deux cas, la disparition de la forêt a été liée aux activités humaines (ROCHE, 1996; MOEYERSONS, 1989). En plus, à l'intérieur de l'Ethiopie, ni le vrai début, ni les vagues postérieures de déforestation ne sont autant en phase que souvent prétendu. Des sols anciens, en relation avec la disparition de la forêt primaire (BRANCACCIO *et al.* 1997), varient en âge entre 5160 ± 80 (May Makden, Tigré) et 300 ± 60 années 14C BP (Adi Kolen, Tigré). L'âge 14C de ±3090 BP (NYSSEN, 2001) pour le début de la phase de dégradation à Tsigaba s'inscrit parfaitement dans cette période. En plus, les paléosols, sensés indiquer des pulsations humides post-déforestation dans la région de Adwa (OGBAGHEBRIEL BERAKHI *et al.* 1997; MACHADO & PEREZ-GONZALEZ, 1998), fournissent des ages radiocarbones calibrés qui se chevauchent entre 1400 - 1960 AD. Ainsi il est impossible de juger si une ou deux périodes humides se sont produites (NYSEN *et al.* 2003). Pour autant que nos études permettent de comprendre, des périodes, courtes dans le temps et dans l'espace, peuvent exprimer des reprises temporaires de la forêt. En 15 ans une parcelle en défens peut récupérer 40 cm de matériel organique, érodé plus haut sur la pente et transitant la parcelle (DESCHEEMAEKER *et al.* 2003).

En plus, quand une détérioration climatique accompagne un recul régional ou subcontinental de la forêt, la première ne doit pas être considérée automatiquement comme la cause de la deuxième. Ceci peut être illustré par le cycle hydrologique (Fig. 5). Selon les modèles appliqués (BROWNING & GURNEY, 1999), les précipitations sur les continents sont de trois à quatre fois supérieures à l'équivalent du volume d'eau apporté directement par les vents vers les continents sous forme de vapeur d'eau. C'est l'évapotranspiration qui est à la base de ce 'recyclage' des eaux de précipitation. Mais chaque évènement de précipitation mène à une perte des eaux par le ruissellement et la percolation. Ainsi l'évapotranspiration à partir de l'aire de l'évènement ne récupère qu'une partie des eaux précipitées, ce qui mène à des précipitations réduites plus loin dans le continent. Il est connu qu'une forêt dense donne des taux d'évapotranspiration beaucoup plus élevés que les autres types de végétation (WHITMORE, 1998). Une exploitation de la forêt dans une partie du continent va nécessairement réduire l'évapotranspiration de cette zone et ainsi provoquer une réduction des précipitations plus loin dans le continent. En Amazonie, l'abattage continuel mène déjà à des baisses et des irrégularités considérables dans les précipitations. Ainsi, la ville de Menaus, jadis en pleine forêt, connaît aujourd'hui plus de 73 jours sans pluie (GASH *et al.* 1996). Il est évident que la déforestation généralisée en Afrique centrale et orientale depuis 5000 BP a nécessairement dû aboutir aux mêmes types d'aberrations météorologiques que celles observées aujourd'hui en Amérique du Sud.

En appui des arguments précédents vient se joindre un argument absolu. Il y a notamment le fait que le climat actuel, considéré généralement comme étant plus sec que pendant la mi-Holocène, supporte toujours des couvertures arbustives. Ainsi la forêt climacique de Dess'a, à quelque 150 km au nord-est de Mekelle. Elle est menacée, non par la sécheresse, mais par sa mise

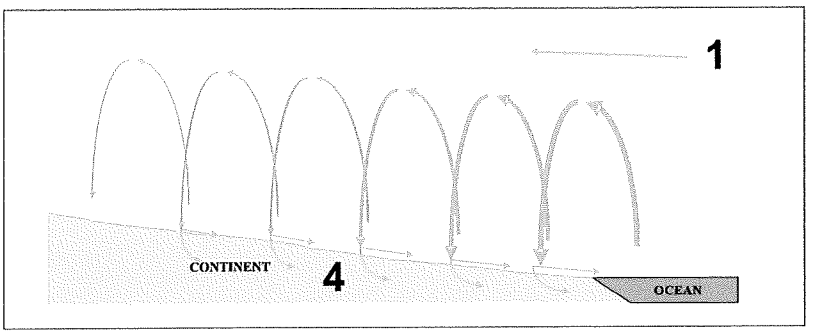

Fig. 5: Dans le cycle hydrologique, les eaux apportées par les vents sous forme de vapeur sont recyclées 2 à 3 fois sur les continents. Sous forêt dense, les pertes sont les plus basses dans ce recyclage. Ce recyclage fait que, à l'échelle mondiale, les précipitations sont de 3 à 4 fois supérieures à l'équivalent de volume d'eau apporté directement par les vents sous forme de vapeur (BROWNING & GURNEY 1999)

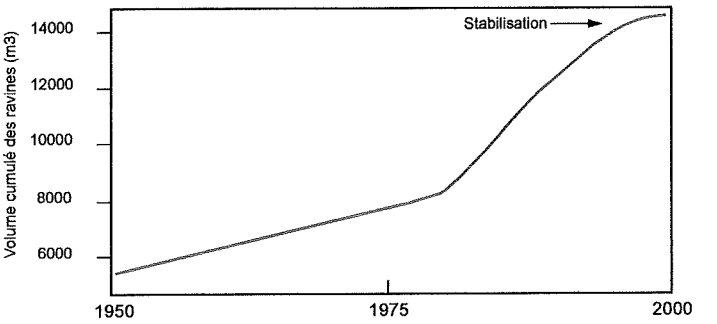

Fig. 6: Evolution du volume cumulé des ravines dans un bassin de 756 ha, aux environs de Hagere Selam, basé sur la méthode HAGETIM. L'augmentation du volume cumulé à partir de 1980 est attribuée à la croissance de la pression humaine combinée avec une période plus sèche. La diminution de la progression à partir de 1997-98 reflète le début de la construction de checkdams dans la région (NYSSEN 2001)

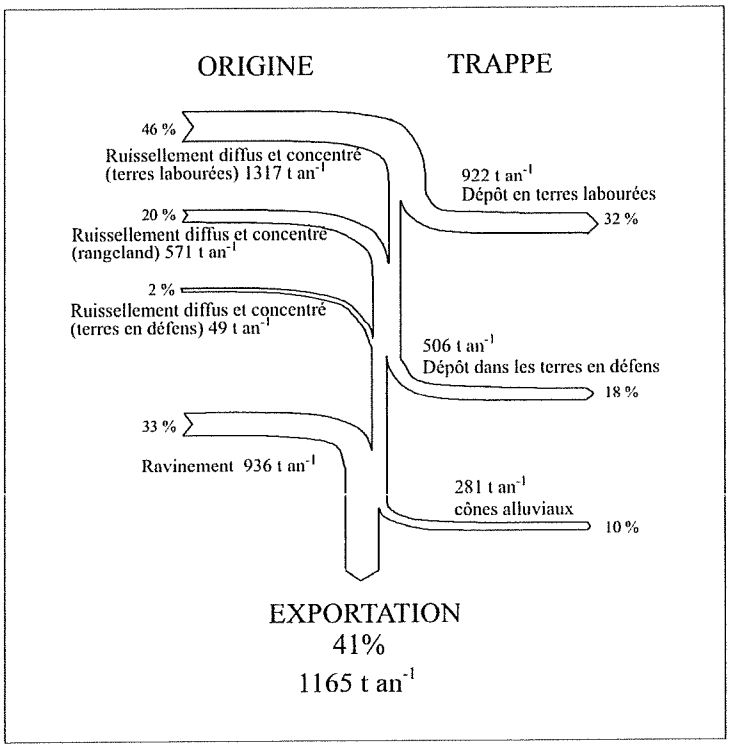

Fig. 7: Bilan sédimentaire du Bassin de Zenako - Argaka pour la période 1998 - 2001. A noter que le dépôt dans les parcelles sous culture se fait derrière des murailles (NYSSEN 2001).

en feu annuelle par les Afars. En plus, la région compte des milliers de forêts sacrées autour des églises. La plupart de ces forêts sont conservées par les autorités ecclésiastiques en prévision de la production de bois, destiné à la maintenance et la restauration des églises dont beaucoup existent depuis plus d'un millénaire et demi. Enfin, la mise en défens par les autorités éthiopiennes de terres marginales conduit à une reprise étonnante de la végétation arborescente (DESCHEEMAEKER *et al.* 2003).

Le progrès de la dégradation environnementale depuis les dernières décennies

La méthode HAGETIM révèle que la grande majorité des vallées qui sont actuellement ravinées, étaient encore non incisées dans les années cinquante et marécageuses pendant toute l'année. Le ravinement a commencé à affecter la région étudiée avant la fin des années soixante, quoique le phénomène se soit intensifié à partir de 1980 (Fig. 6).

Le ravinement s'est déclenché à l'occasion de l'introduction de l'Eucalyptus dans les vallées et/ou le convertissement des derniers range lands en terres cultivées. La pression démographique apparaît clairement.

Il apparaît également que des travaux infrastructuraux modernes peuvent provoquer le ravinement. Dans le cas particulier de la construction de la nouvelle route 'tous temps' entre Mekelle et Abi Adi, le nombre de ponceaux est restreint ce qui conduit à une concentration de ruissellement et le ravinement à partir des embouchures. La perméabilité réduite de la surface compactée de la route en aggrave l'effet (NYSSEN *et al.* 2002c).
Dans ces deux exemples, le développement de ravines, et la chute des nappes d'eau qui l'accompagne, est dans beaucoup de cas dû aux actions humaines.

LES REPONSES A LA DESERTIFICATION

La conservation du sol

Quoique pas toujours conçues comme telles, plusieurs actions, lancées par les autorités Ethiopiennes et la F.A.O. au milieu des années soixante-dix, contribuent à la lutte contre la désertification. La stratégie de la conservation du sol est basée sur l'application généralisée de quelques mesures simples (SANDERS, 1987). Celles-ci incluent:

- la construction, parallèlement aux courbes de niveau, de murailles en terre ou en pierres
- la construction, à l'intérieur des ravines, de checkdams en pierres
- la création de zones en défens du pâturage.

Le traitement récent du bassin de Zenak'o-Argak'a (NYSSEN, 2001), grand de 200 ha, a influencé de manière très positive son bilan sédimentaire (Fig. 7). Les 'trappes', où le sédiment se redépose à l'intérieur du bassin sont essentiellement le résultat de ces mesures.

Les murailles (NYSSEN *et al.* 2000a) à l'intérieur des parcelles constituent une première trappe. Pendant la période des mensurations de 1998-2001, les murailles étaient encore nouvelles. Aujourd'hui, la plupart d'entre elles a atteint sa capacité de stockage et les sédiments qui arrivent maintenant sont fixés de manière moins efficace. La continuation du bon fonctionnement du système exige le rehaussement des murailles, programme d'action qui vient d'être annoncé. Nos études indiquent également que le matériel stocké derrière les murailles est apporté pour la moitié par le ruissellement et pour la moitié par le labour à la charrue d'ard, la maresha (NYSSEN *et al.* 2000b).

Les terrains en défens et les vieilles forêts constituent une deuxième trappe (Fig. 7). A Hechi (Fig. 1), une ancienne forêt d'église (Luqmuts), une parcelle en défens depuis 15 ans et une parcelle en range land se trouvent côte à côte sur un escarpement de 50 m de haut, taillé dans le bed-rock de calcaires d'Antalo. Les sédiments, érodés des parcelles cultivées, plus haut sur la pente, descendent de l'escarpement. Le passage de ces sédiments à travers de la parcelle en range land y occasionne des érosions supplémentaires. Mais la parcelle en défens et la forêt Luqmuts freinent sérieusement ce transport ce qui est attesté par la présence d'une couche colluvionaire importante (NAUDTS *et al.*

2002). Quoique la fixation de sédiments en transit ne contribue pas à une refertilisation des champs en amont, il apparaît que les terrains boisés peuvent jouer un rôle dans la récupération des terres érodées ou former un tampon protecteur autour des réservoirs contre leur ensablement.

Le rechargement des eaux souterraines

Les terres en défens et les anciennes forêts jouent probablement un rôle dans le remplissage des nappes d'eau. On parle d'une augmentation du nombre et du débit des sources.

D'autre part, le rôle du ravinement dans la baisse de la nappe aquifère commence à diminuer grâce à une action régionale de construction de checkdams à l'intérieur des ravines. Dans le bassin de Zenak'o-Argak'a (Fig. 7), cette action n'a pas encore conduit au remplissage des ravines mais une stabilisation de la situation se déduit de la tendance récente à une horizontalité de la courbe qui représente le volume total des ravines dans la région (Fig. 6) (VEYRET-PICOT *et al.* 2001).

Mais il existe des mesures récentes qui ont influencé directement et très considérablement le niveau des eaux souterraines. Il s'agit de la construction de quelque milliers de mares mais surtout aussi de l'aménagement de réservoirs dont la capacité peut aller jusqu'au million de m^3. En 1994, la commission nationale d'irrigation a projeté la construction de 500 réservoirs du dernier type, destinés à l'amélioration de la production de vivres. Mais à l'heure actuelle, seulement 55 des retenues d'eau ont été achevées et une bonne partie des schémas d'irrigation ne satisfont pas aux besoins. La première raison du mauvais fonctionnement est le colmatage rapide par les sédiments érodés de l'intérieur des bassins. Chini pond, un petit réservoir à 5 km à l'Ouest de Hagere Selam (Fig. 1), est un cas typique. La surface originelle d'eau libre de ± 11,900 m^2 a été réduite à environ 50 % en deux ans. Ainsi le volume d'eau retenu ne suffisait plus à alimenter le schéma d'irrigation projeté. Un deuxième problème se pose pour les lacs de retenue en domaine de calcaires d'Antalo. Cette lithologie se caractérise par une grande perméabilité secondaire due à des joints et des crevasses (TESFAYE CHERNET & GEBRETSADIK ESHETE 1982). Des pertes importantes en eau sont notées. Ainsi le réservoir de May Leiba (Fig. 1) qui n' a jamais atteint son plein depuis sa construction en 1999. L'importante percolation qui s'est créée depuis la construction du barrage s'est traduite par l'installation d'un régime pérenne sur les chutes d'eau de Tinsehe, 2,5 km en aval du lac. Un autre cas de perte en eau considérable se présente au barrage de Sewhimeda pond, 15 km à l'Ouest de Mekelle. Le lac se vide endéans quelques jours après les pluies!

Les lacs de retenue sont souvent considérés comme une non-réussite, mais il est vrai qu'ils contribuent à la recharge des nappes aquifères. Sur basalte et grès d'Amba Aradam, la nappe s'étend vers l'amont (Fig. 8a). Ainsi, le service public des eaux a commencé à exploiter à partir de 1992 la nappe nouvellement rétablie en amont de Chini Pond pour l'approvisionnement de fonctionnement Selam. En ce qui concerne les réservoirs sur calcaires, ceux-ci généralement nourrissent les nappes phréatiques perchées en aval (Fig. 8b). De nouvelles sources apparaissent et d'autres deviennent plus puissantes. On signale ici le cas du barrage de Chichat, à 10 km de l'Est de Mekelle. Les paysans locaux y exploitent maintenant des nouvelles sources d'eau, quelques kilomètres en aval du site, destiné originellement à être aménagé pour le nouveau schéma d'irrigation.

CONCLUSIONS

La dégradation du paysage et la désertification : histoire et influence humaine

1) Les conditions environnementales de la fin du Pléistocène à la mi-Holocène ont été très humides dans la région étudiée. Ces conditions se sont installées avant 13.000 BP
2) Au Tigré, cette période a pris fin entre 5.000 BP et aujourd'hui. A Tsigaba, la fin du développement du barrage en tufs calcaires se situe vers 3.000 BP et sa cause est à déduire d' un recul de la forêt. Les arguments développés ne laissent aucun doute sur l'origine

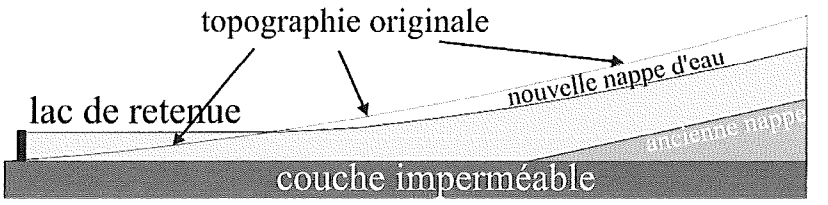

Fig. 8a: représentation schématique de la remontée de la nappe aquifère en cas d'une installation du réservoir sur une couche imperméable comme le grès d'Amba Aradam ou les altérites argileuses de l'une des séries des basaltes du plateau.

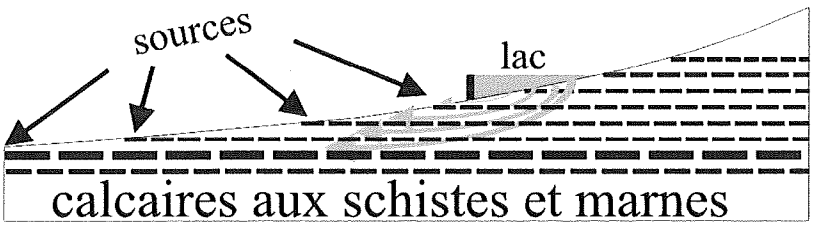

Fig. 8b: Les réservoirs construits sur les calcaires d'Antalo montrent des fuites, ce qui contribue au rétablissement d'anciennes nappes phréatiques perchées et à l'apparition de nouvelles sources.

anthropogène de l'ouverture de la forêt, parce que le climat actuel, quoique considéré comme nettement moins humide que celui de la mi-Holocène, permet à des anciennes forêts comme les nombreuses forêts d'églises et les forêts climaciques comme celle de Dess'a, de se maintenir et à de nouveaux boisements, dans les terres à défens, de se développer.

3) Le ravinement, essentiellement provoqué par des interventions humaines, a été un facteur important dans la désertification de la région pendant le dernier siècle. La dégradation se manifeste par des pertes en terres considérables et par une baisse des nappes aquifères.

L'avenir

Des murailles selon les isohypses, des checkdams dans les ravines, la mise en défens de terres marginales et la construction de mares et de petits lacs de retenue sont autant de moyens qui prouvent que la situation peut être améliorée. Mais l'effort, fait actuellement par le gouvernement, perdra de son effet si l'on ne continue pas sur son élan. Les murailles et les checkdams doivent être maintenus et leur capacité de rétention augmentée. Il est nécessaire d'étudier le rôle possible des terres en défens dans la protection des réservoirs contre leur colmatage. Enfin, les petits lacs de retenue, même s'ils ne rencontrent pas les objectifs posés, jouent un rôle très important dans le rétablissement des nappes d'eau et dans la régularisation des sources et des cours d'eau. Ils sont cruciaux pour l'environnement dans le cadre d'une agriculture durable.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été possible grâce au soutien financier du 'Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek – Vlaanderen (project G006598N: "Desertificatie en anthropogeen versterkte erosieprocessen in een tropisch bergrivierbekken: Tigré, Ethiopië"), du Vlaamse Interuniversitaire Raad (EI 237 Zala-Daget-project: "Fighting desertification in the Tigray Highlands, Ethiopia: lessons to be learnt from successes and failures of soil erosion control measurements") et de l'université de Mekelle

BIBLIOGRAPHIE

BEYTH, M. 1972. Paleozoic-Mesozoic sedimentary basin of Makalle outlier. - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 56:2426-2439.

BRANCACCIO, L., CALDERONI, G., COLTORTI, M., DRAMIS, F. 1997. Phases of soil erosion during the Holocene in the Highlands of Western Tigray (Northern Ethiopia): a preliminary report. - *In* BARD, K. (éd.), The environmental history and human ecology of Northern Ethiopia in the Late Holocene. Istituto Universitario Orientale, Napoli, pp 30-48.

BROWNING, K.A. & GURNEY, R.J. 1999. Global energy and water cycles. - Cambridge University Press, 292 pp.

DESCHEEMAEKER, K., NAUDTS, J., ROSSI, J., NYSSEN, J., MITIKU H., POESEN, J. DECKERS, J., MOEYERSONS, J. 2003. "Accumulation of sediment and organic carbon in the Tigray Highlands (Northern Ethiopia".Poster presented at the thematic day of the Belgian Soil Science Society in Brussels (19 November 2003): "C-sequestration in terrestrial ecosystems", Royal Academies for Science and the Arts of Belgium".

ETHIOPIAN MAPPING AUTHORITY 1996. Sheets 1339 A3-A4, Addis Ababa.

FORD, T. & PEDLEY, H.M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. - *Earth Science Reviews* 41:117-175.

GASH, J.H.C., NOBRE, C.A. & ROBERTS, J.M. 1996. Amazonian deforestation and climate - Wiley, Chichester.

GRIFFITHS, J.F. 1972. Chapt 11: Ethiopian highlands. - *In* GRIFFITHS, J.F. (éd.) World Survey of Climatology Volume 10: Climates of Africa. Amsterdam, London, NewYork pp. 369-378.

HULME, M. 1996. Climate Change Within the Period of Meteorological Records. - *In* ADAMS, W.M., GOUDIE,A.S. & ORME, A.R. (éds.), The Physical Geography of Africa. Oxford University Press pp. 88-102.

MACHADO, M. & PEREZ-GONZALEZ, A. 1998. Paleoenvironmental changes during the last 4000 yr in Tigray, Northern Ethiopia - *Quaternary Research*, 49:312-21.

MOEYERSONS, J. 1989. Les conditions paléoenvironnementales depuis 30.000 BP dans la region de l'abri-sous-roche de Shum Laka au Cameroun occidental - *Ann. Roy. Mus. Centr. Afr. Tervuren, Ser. Econ. Sc.*, 25:255-262.

MOEYERSONS, J., NYSSEN, J., DECKERS, J., MITIKU HAILE, POESEN, J. (sous presse) The climatic significance of Late-Pleistocene and Early- to Middle-Holocene mass movements and their present day remobilization in Rwanda and Ethiopia - Proc. Int. Conf. Trop. Clim., Meteor., Hydr., Brussels, 12-14 December 2001.

NAUDTS, J. 2002. Les Hautes Terres de Tembien, Tigré, Ethiopie; Dislocation et persistance d'une ancienne civilisation agraire; Conséquences sur la dégradation des terres - Mémoire Diplôme d'Agronomie Tropicale. CNEARC, Montpellier, 147 pp.

NAUDTS, J., DE GEYNDT, K., NYSSEN, J., DECKERS, J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS, J., POESEN, J. 2002. The trap efficiency for sediment and carbon in exclosures on steep slopes. Tembien Highlands, Tigray, Ethiopia - Abstr. Int. Coll. Land use, Erosion & Carbon Sequestration, Montpellier, 23-28 Sept. 2002,p.120.

NYSSEN, J., 1995. An approach of soil erosion in the Tigray highlands (Ethiopia) - Unpublished MSc-dissertation, University of Liège.

NYSSEN, J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS, J., POESEN, J., DECKERS, J. 2000a. Soil and water conservation in Tigray (Northern Ethiopia): the traditional daget technique and its integration with introduced techniques - *Land Degradation and Development, 11*: 199-208.

NYSSEN, J., POESEN, J., MITIKU HAILE, MOEYERSONS, J., DECKERS, J. 2000b. Tillage erosion on slopes with soil conservation structures in the Ethiopian Highlands - *Soil & Tillage Research* 57:115-127.

NYSSEN, J. 2001. Erosion processes and soil conservation in a tropical mountain catchment under threat of anthropogenic desertification - a case study from Northern Ethiopia - Unpublished Ph.D thesis, Department of Geography, K.U.Leuven, 373 pp.

NYSSEN, J., MOEYERSONS, J., POESEN, J., DECKERS, J., MITIKU HAILE 2002a. The environmental significance of the remobilization of ancient mass movements in the Atbara-Tekeze headwaters, Northern Ethiopia - *Geomorphology*, ser. 49:303-322.

NYSSEN, J., MOEYERSONS, J., LANG, A., POESEN, J., DECKERS, J., MITIKU. HAILE 2002b. The environmental significance of the end of tufa dam build-up during the early to middle Holocene in northern Ethiopia - Proc. Int. Symp. Clim. Changes, Active Tectonics and Related Geomorphic Effects in High Mountain Belts and Plateaux. December 9-10 (Addis Ababa 2002) p. 29.

NYSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., LUYTEN, E., VEYRET-PICOT, M., DECKERS, J., MITIKU HAILE, GOVERS, G., 2002c. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands - *Earth Surf. Proc. and Landf.*, 27: 1267-83.

NYSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., DECKERS, J., MITIKU HAILE & LANG, A. 2003 (sous presse) Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean Highlands – a state of the art - *Earth-Science Reviews.*

NYSSEN, J., POESEN, J., VANDENREYKEN, H., MOEYERSONS, J., DECKERS, J., MITIKU HAILE, SALLES, C. (en presse) Spatial variability of rain and its erosivity in a tropical mountain catchment, Tigray, Northern Ethiopia. - Proc. Int. Conf. Trop. Clim., Meteor., Hydr., Brussels, 12-14 December 2001.

OGBAGHEBRIEL BERAKHI, BRANCACCIO, L., CALDERONI, G., COLTORTI, M., DRAMIS, F., BELAY TEGENE, UMER, M. 1997. Geomorphological and sedimentary records of Holocene climatic changes and human impact in the Highlands of Northern Ethiopia. - *In* Federici, P.R. (éd.), 4th Int. Conf. Geomorphology - Abstracts. Supp. Geogr. Fis. e Din. Quat., Supp. 3(1):77.

ROCHE, E. 1996. L'influence anthropique sur l'environnement à l'âge du fer dans le Rwanda ancien - *Geo-Eco-Trop* 20:73-891.

SANDERS, D.W. 1987. FAO-activities in soil conservation. – *In* MOLDENHAUER, W.C. & HUDSON, N.W. (éds.), Conservation farming on steep lands, SWCS & WASWC workshop 22-27 March 1987, San Juan, Puerto Rico, pp. 54-62.

SOIL CONSERVATION RESEARCH PROGRAMME 2000. Soil erosion and conservation database, 7 fasc. Centre for Development and Environment, University of Berne.

TESFAYE CHERNET & GEBRETSADIK ESHETE 1982. Hydrogeology of the Mekelle area (ND37-11) - Ministry of Mines and energy Memoir 2 (Addis Ababa1982), 50 pp.

UNEP 1994. United Nations Convention to Combat Desertification – Genève, 71 pp.

VEYRET-PICOT, M., POESEN, J., NYSSEN, J., MOEYERSONS, J. 2001. Ravijnontwikkeling en -erosiecontrole-maatregelen in een tropisch bergrivierbekken, Tigray, Ethiopië. - *De Aardrijkskunde.* 25(4):59-71.

VEYRET-PICOT, M., NYSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., MITIKU HAILE, DECKERS, J. 2002. Gully evolution in a tropical mountain catchment, Tigray, Ethiopia - Abstr. Int. Coll. Land use, Erosion & Carbon Sequestration, Montpellier, 23-28 Sept. 2002, p. 55

WHITMORE, T.C., 1998. An introduction to tropical rain forests. - Oxford, Oxford University Press, 282 pp.

SELESHI YILMA & DEMAREE, G. 1996. Identifying the Major Cause of the Prevailing Summer Rainfall Deficit over the North-Central Ethiopian Highlands Since the Mid-60s. - *In* Demarée, G., Alexandre, J. & De Dapper, M. (éds.), Proc. Int. Conf. Trop. Clim., Meteor., Hydr., Brussels, 22-24 May 1996 pp. 516-531.