

UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI

FACULTE D'AGRONOMIE

THESE

PRESENTEE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES NATURELLES

par

Yadji GUERO

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MECANISMES DE
DEGRADATION PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS SOUS CLIMAT
SAHELIEN :**

Exemples pris dans la vallée du Moyen Niger

Soutenue le 26 janvier 2000, devant la Commission d'Examen

MM. A. YENIKOYE, Professeur à l'U.A.M.

Président

K. AMBOUTA, Maître de Conférences à l'U.A.M.

A. DECARREAU, Professeur à l'Université de Poitiers

Examineurs

G. TAHAR, Professeur à l'Université de Tunis

J. DUCLOUX, Maître de Conférences à l'Université de Poitiers *Directeur de thèse*

Résumé

Les populations sahéniennes au sud du Sahara comptent, pour leur sécurité alimentaire, sur la mobilisation des eaux de surface des grandes vallées où sont localisées les principales voies d'eau, le Niger et le Sénégal. Depuis plusieurs dizaines d'années, des périmètres irrigués ont donc été ouverts mais la plupart connaissent actuellement une dégradation généralisée de fertilité des sols.

Le présent travail a pour but de contribuer à la connaissance des mécanismes de cette dégradation en choisissant trois périmètres géologiquement bien différenciés. Il s'agit, d'amont en aval, des périmètres irrigués de Tillakaina, de Sona sur la terrasse moyenne T3 et de Kollo sur la basse terrasse T4 dans la vallée du Moyen Niger. Tous ces périmètres sont marqués par l'hydromorphie considérée comme ancienne à Tillakaina et Sona et actuelle à Kollo.

L'eau d'irrigation, prélevée du fleuve Niger, est très peu minéralisée et a un faciès bicarbonaté sodique potentiellement nuisible aux sols.

Les minéraux argileux dominants sont la kaolinite et la smectite et les sites étudiés ne se distinguent que par leurs valeurs relatives. Sous le climat tropical sec actuel, les minéraux argileux des horizons superficiels des sols de la terrasse moyenne T3 se dissolvent par xérolyse, la smectite particulièrement, d'où une différenciation minéralogique par rapport aux horizons profonds.

La différenciation géologique a engendré celle de la garniture ionique marquée par l'apparition de pôles magnésien et sodique. La tendance à la sodisation du complexe d'échange est attestée par les isothermes d'échange Na-Ca. Ces deux pôles sont reconnus fortement impliqués dans l'altération des propriétés fonctionnelles des sols.

La remontée ou la formation des nappes, suite l'irrigation incontrôlée ou à la crue du fleuve, « réveille » l'hydromorphie et mobilise les sels. La basse terrasse T4 de Kollo a offert une distribution séquentielle des sels à base de sulfates. Les sols de la moyenne terrasse T3 présentent des valeurs de pH situées aux environs de la neutralité, contrairement aux résultats de la simulation de l'évaporation des extraits salins qui indiqueraient une tendance vers une alcalinisation.

La dégradation de la fertilité des sols irrigués dans la vallée du Moyen Niger n'est pas un phénomène généralisé et uniforme, mais très nettement contrôlée par les conditions physico-chimiques des bassins versants locaux.

SOMMAIRE

PROBLEMATIQUE

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA REGION ET DES SITES ETUDIES

I.1 -LA VALLEE DU MOYEN NIGER	3
I.1.1- Localisation	4
I.1.2- Contexte géologique	4
I.1.3- Formations superficielles	6
I.1.4- Climat actuel	9
I.2- DESCRIPTION DES SITES	13
I.2.1- Site de Tillakaina	13
I.2.2- Site de Sona	18
I.2.3- Site de Kollo	22
I.3- CONCLUSION	25

CHAPITRE II : LES EAUX D'IRRIGATION

II.1- METHODES D'ANALYSE DES EAUX	27
II.2- RESULTATS	28

CHAPITRE III : LES SOLS DES TROIS PERIMETRES

III.1- METHODES D'ETUDE DES SOLS	33
III.2-	33
III.2.1- Etude morphologique des sols	33
III.2.2- Analyse texturale	37
III.2.3- Complexe d'échange	39

CHAPITRE IV : ETUDE DES ARGILES

IV.1- FRACTIONNEMENT ET ETUDE CRISTALLOCHIMIQUE	48
IV.1.1- Techniques de fractionnement	48
IV.1.2- Techniques d'étude cristalochimique	49
IV.2- RESULTATS	51
IV.2.1- Les altérites	51
IV.2.2- Les sols	53
IV.2.3- Interprétations	66

CHAPITRE V : GEOCHIMIE DES MILIEUX SALINS

V.1- METHODES D'ETUDE	71
V.1.1- Mesure de la conductivité	71
V.1.2- Détermination de la nature des sels	73
V.1.3- Etude de la nappe phréatique	74
V.2- RESULTATS	74
V.2.1- Caractérisation des sels	74
V.2.1.1- Tillakaina	74
V.2.1.2- Kollo	77
V.2.3- Interprétations	84
V.2.3.1- Les identifiés et leurs conditions de formations	84
V.2.3.2- Les nappes	86
V.2.3.3- Origine des sulfates	87
V.2.4- Simulations de l'évaporation des extraits aqueux	87
V.2.4.1- Les minéraux précipitables	87
V.2.4.2- Le comportement des différents éléments chimiques	90
V.3- CONCLUSION	93

CHAPITRE V : INTERACTIONS EAUX-SOLS

VI.1- METHODES D'ETUDE	95
-------------------------------	----

VI.1.1- Extraits salins	95
VI.1.2- Etude des échanges Na-Ca	96
VI.2- RESULTATS	98
VI.2.1- Solutions interstitielles	98
VI.2.2- Isothermes d'échange Na-Ca	103
VI.2.3- Interprétations	104

CONCLUSION GENERALE	106
----------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

PROBLEMATIQUE

Les zones semi-arides de l'Afrique du Sahel sont caractérisées par une grande variabilité pluviométrique qui entraîne une alimentation hydrique insuffisante de la biomasse. Elles connaissent ainsi très régulièrement des déficits alimentaires dont le plus spectaculaire et le plus récent fut celui de 1974.

La réponse immédiate à cette sécheresse est la mobilisation des eaux de surface des grandes vallées où se localisent les principales voies d'eau fluviale, le *Sénégal* et le *Niger*. C'est d'ailleurs le long de ces fleuves que se concentrent majoritairement les peuplements humains. L'élévation des eaux par pompage ou au moyen de barrage semble naturellement la solution la plus immédiate pour irriguer les plaines alluviales et assurer un approvisionnement régulier en denrées alimentaires. Des programmes d'aménagement des terres, à l'intérieur de périmètres plus ou moins importants et suivant diverses stratégies de gestion de l'eau, sont régulièrement lancés dans les différents pays. Certains sont déjà anciens mais l'évaluation de leur performance technique n'en est qu'à son début (IIMI, 1997, 1998). Il est constaté que la plupart des périmètres irrigués connaissent une **dégradation généralisée de fertilité des sols**. Or cette dégradation sous irrigation est un phénomène répertorié dans d'autres zones semi-arides du monde, en Russie, Australie, Amérique du Sud, Chine, Moyen Orient et Afrique du Nord. Son expression la plus visible est le dépôt de sels à la surface des sols (salinisation), la plus courante étant un fort taux de sodium sur le complexe adsorbant (sodisation). On estime que 260 à 340 millions d'hectares présenteraient des sols salés neutres (Dudal, 1990 ; Szabolcs, 1989, *in* Loyer, 1991), et que plus de 560 millions d'hectares seraient couverts par des sols à alcali (Tanji, 1990, *in* Condom, 1996).

Le phénomène est donc très général, mais il semble que les causes et les conséquences soient multiples, aussi importe-t-il de les analyser dans le cadre plus restreint du Moyen Niger.

En Afrique de l'Ouest, à l'exception du lac Tchad où d'importants travaux scientifiques se sont déroulés (Cheverry, 1974 ; Droubi, 1976 ; Maglione, 1976), les sols *halomorphes* (Servant, 1975) ou *salsodiques* (Aubert, 1982) ont été identifiés il y a seulement une quinzaine d'années dans les vallées du Sénégal et du Haut et Moyen Niger. Dans le cas sénégalais, il s'agit de l'imprégnation des alluvions par l'avancée marine dans le continent (Loyer, 1989). Dans le cas de la vallée du Niger, deux situations différentes se présenteraient, d'une part dans le delta intérieur malien où se produirait la remontée des nappes profondes sous l'influence des eaux d'irrigation exagérément appliquées (N'Diaye, 1987 ; Bertrand *et al.*, 1993), d'autre part, dans la partie sahélienne qui constitue le cadre de notre travail.

Dans la vallée du Moyen Niger, les premiers travaux se sont intéressés à l'identification des sols soit à petite échelle (Gavaud et Bocquier, 1965 ; Gavaud, 1977) soit à de grande échelle (SOGETHA, 1971 ; Féau, 1976 ; Eisma, 1978) que justifiaient des études des périmètres déjà en exploitation. A partir de 1976, une certaine sodicité fut identifiée (Valet, 1976, 1981 ; INRAN, 1981 ; Novak, 1986 ; Guéro, 1987) indiquant par là le développement d'une dégradation des sols. Or, cette dégradation fut mise au compte de l'irrigation qui devait

déclencher et orienter les processus. Récemment, des chercheurs (Barbiéro, 1994 ; Marlet, 1995) ont donc exploré cette hypothèse et étudié l'impact des eaux d'irrigation qui se concentrent sous l'action de la forte évaporation climatique.

Cette approche constituera le premier axe de ce travail au cours duquel seront étudiées les propriétés des eaux utilisées pour l'irrigation.

Cependant, le fait que l'eau d'irrigation soit considérée comme la seule cause de la dégradation doit être reconsidérée. En effet, la plupart des sols ont connu des processus évolutifs variés qui se sont succédés tant en liaison avec leurs propres propriétés que suivant les conditions environnementales. De ce point de vue, les sols ont ainsi acquis des traits matériels spécifiques qui ont orienté leur autodéveloppement (Kovda *et al.*, 1967). Ces traits, souvent relictuels, comme par exemple les nodules calcaires issus de phases climatiques plus humides et en présence de nappes phréatiques (Guéro et Ambouta, 1988), pourraient être réactivés, notamment sous l'action des irrigations, puis induire ou exacerber une tendance à la dégradation.

Ces quelques considérations justifient donc pleinement l'intérêt qui sera porté aux sols naturels et aux sols soumis à l'irrigation.

Cette deuxième approche sera complétée par des simulations du système sol-solutions. En effet, une fois certains traits réactivés, s'ensuivront des mécanismes d'échange, parfois accompagnés de précipitations de sels, qui sont en fait la cause profonde de la dégradation.

On introduit ainsi la question décisive des interactions Eau-Sol.

Pour réaliser ce travail sans doute ambitieux, nous avons retenu :

- le périmètre de Tillakafna, situé sur la terrasse moyenne (T3), et irrigué depuis 1968 ;
- le périmètre de Sona, localisé sur la même terrasse T3, irrigué de 1986 à 1990, puis abandonné ;
- le périmètre de Kollo, implanté sur la terrasse T4, irrigué depuis 1980.

Dans les trois périmètres, l'eau d'irrigation est (ou a été) prélevée dans le fleuve Niger.

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA REGION ET DES SITES ETUDIES

I.1 LA VALLEE DU MOYEN NIGER

I.1.1 - Localisation

La région étudiée est localisée dans la partie ouest de la République du Niger (fig.I.1) et comprise entre les méridiens 0° et 3° E et les parallèles 13° et 15° N.

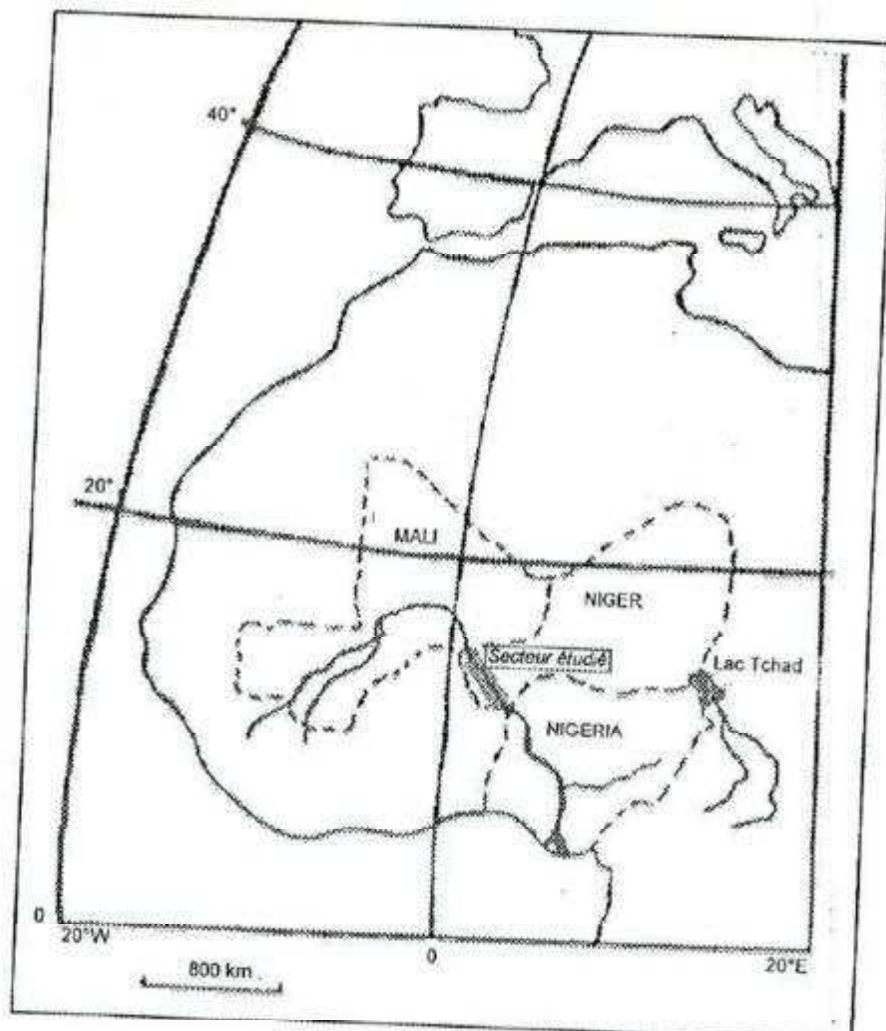


Fig. I.1 : Localisation de la vallée du Moyen Niger et de la zone d'étude

La partie du fleuve irriguant la République du Niger est appelée communément le Moyen Niger. Seul cours d'eau permanent du pays, le fleuve coule en sa partie occidentale sur une distance de 550 km. Ce long

cours d'eau paisible, en raison de sa faible pente (15 m par km), s'écoule selon l'axe NNW-SSE. Le débit moyen journalier à Niamey est de $1650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Les débits moyens de $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lors des étiages, ont atteint $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 1984. Les variations saisonnières du débit forment une courbe unimodale asymétrique avec un maximum en février et un minimum en juillet.

Pour la zone considérée, la crue est indépendante de la pluviométrie et ne dépend que du régime du delta malien. Ce décalage de la crue dans le temps (crue en saison sèche) est ainsi favorable à l'irrigation.

On distingue deux groupes d'affluents du fleuve en territoire nigérien :

- les anciens affluents, aujourd'hui inactifs, communément appelés *Dallols* (*Dallols* Bosso, Fogha et Maouri). Ils ne coulent qu'en certaines sections en période de pluies.
- les affluents actifs sur les deux rives.

En rive droite se trouvent les principaux affluents qui coulent sur le Liptako. Le Dargol, la Sirba et le Goroubi, le Dyamangou et le Gorouol, en provenance du Burkina Faso, totalisent 115.000 km^2 de bassins versants et contribuent pour 7% aux écoulements du fleuve. La Tapoa et la Mékrou, issus du Bénin, ont 380.000 km^2 de bassin versant et leur apport d'eau au fleuve se chiffre à 15%. Tous ces affluents coulent pendant 6 mois et, pour l'autre moitié de l'année, ils se transforment en des chapelets de mares.

Les affluents de la rive gauche sont très peu étudiés. Les informations rapportées ici sont issues de Ousmane *et al.* (1988). Il s'agit de ruisseaux localement appelés *koris* dont les bassins versants sont de petite taille (100 à 400 km^2 dans 90% des cas). Le ruissellement qui les génère est issu des surfaces cuirassées des plateaux peu de temps après le début d'une pluie. L'écoulement, de type torrentiel, dure 6 à 24 h et exceptionnellement un mois (août le plus généralement) pour les plus grands. En quelques sections déprimées de ces *koris*, se forment des mares qui gardent l'eau pendant 3 à 6 mois après la fin de pluies.

Il n'en reste pas moins que c'est le fleuve Niger qui constitue l'approvisionnement en eau essentiel et durable. C'est pourquoi plus de 90 % des superficies actuellement irriguées sont localisées dans la vallée du Moyen Niger.

1.1.2 Contexte géologique

La plus grande partie du Moyen Niger s'étend sur l'extrémité orientale du craton ouest africain appelé *Liptako*. Cet espace géographique est réparti sur le Burkina Faso, le Mali et le Niger. Géologiquement, c'est une ancienne pénéplaine, en pente douce vers le sud-est, dont l'altitude moyenne varie entre 200 et 250 m au dessus du niveau de la mer. Des collines latéritiques tabulaires à pentes raides émergent de cette plaine. Le contrôle du modèle par la géologie s'exprime par les formations granitiques omniprésentes dans les plaines et les plateaux dus à la ferralitisations de ces mêmes granites ou des schistes (Machens, 1973).

Le Liptako nigérien, qui correspond à la partie extrême orientale du craton Ouest Africain se présente sous forme de bandes métasédimentaires et volcanosédimentaires séparées par des intrusifs granitiques contenant des reliques archéennes (fig. 1.3) (Dupuis *et al.*, 1991 ; Machens, 1973 ; Vidal *et al.*, 1992).

Les bandes méta-sédimentaires et volcano-sédimentaires sont principalement composées de grauwackes, de schistes argileux, de micaschistes et des roches vertes. Les intrusifs sont principalement des granites, des granodiorites et des diorites peu déformés (Machens, 1973). Des filons de différentes natures, particulièrement de dolérites bleu-verdâtre à grain moyen ou fin contenant de la pyrite, recoupent ces roches intensément fracturées. Ce crâton a connu plusieurs épisodes de déformation dont la plus visible, de nos jours, est celui du Birimien (entre 2194 et 1860 MA). Cet épisode coïncide avec la mise en place des plutons granitiques (Dupuis *et al.*, 1991 ; Machens, 1973). A la suite de cet épisode de déformation, le socle ne connaît plus qu'une tectonique cassante responsable des injections doléritiques dans l'ensemble du Liptako (Bessoles, 1977, *in* Girard, 1993).

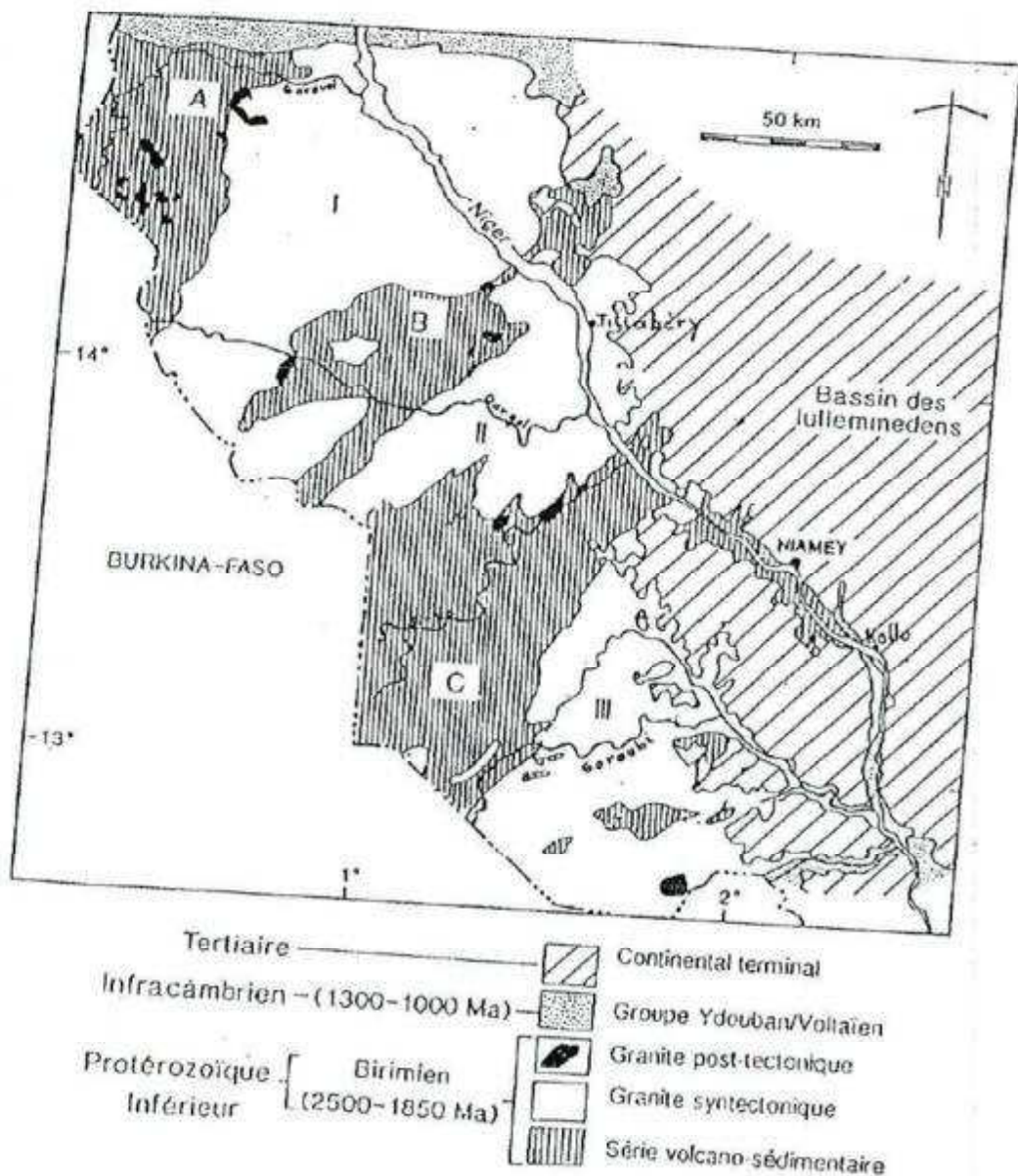


Fig. 1.2 : Carte géologique du Liptako nigérien (Machens, 1973, *in* Girard, 1993)

L'histoire géologique a produit un socle fracturé. L'analyse des linéaments relevés sur le socle, dans la partie sud du Liptako, montre que :

- la schistosité des roches sédimentaires et la foliation des granitoïdes rencontrent un maximum aux directions NE à ENE ;

- les diaclases et les dykes sont ENE à E dans les séries sédimentaires et plutôt N dans les granitoïdes,
- les fractures sont orientées préférentiellement E dans les bandes sédimentaires et N dans les intrusifs (Bérard et Taguay, 1972 ; Girard, 1988 ; Jegouzo, 1987 ; Machens, 1973, *in* Girard, 1993).

Après une longue émergence, la couverture sédimentaire se met en place au Crétacé. Les dépôts de grès continentaux feldspathiques et argileux (smectite, kaolinite et illite) forment le Continental Intermédiaire et l'Hamadien. Ensuite, à l'Oligocène-Miocène, les formations discordantes du Continental terminal (CT) se déposent. Ces formations sont constituées des grès argileux (kaolinite essentiellement) au sein desquels s'intercalent des bancs d'oolithes ferrugineuses d'épaisseur variable (Dubois, 1979). Dans la région étudiée, seul le terme supérieur (CT3) est observable ; il repose alors en discordance sur le socle précambrien ou les formations primaires. Son épaisseur ne dépasse guère 25 m en rive gauche du fleuve ; en rive droite, quand il existe encore, il atteint au plus 10 m.

De la fin du Pliocène à l'Actuel, la continentalité de la région s'affirme. Le Quaternaire va ébaucher les derniers modelés du paysage moderne. L'érosion des roches du socle s'est accentuée suite aux changements climatiques et à un léger soulèvement de la partie ouest du Liptako, provoquant le creusement de la vallée du Niger et de ses affluents occidentaux (Machens, 1973).

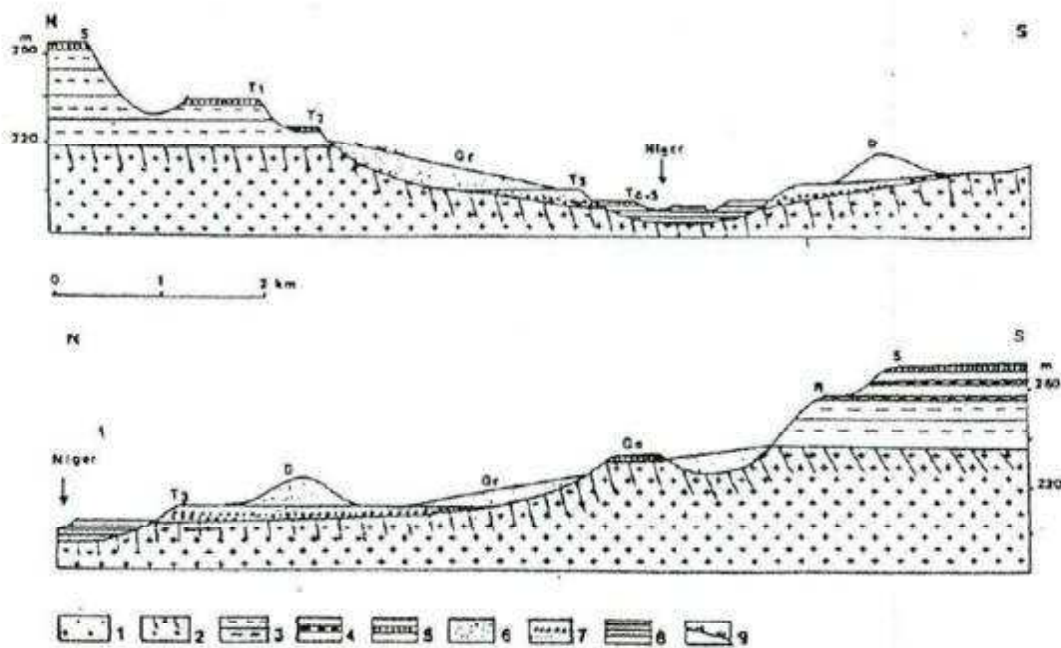
I.1.3 - Les formations superficielles

En Afrique de l'Ouest, la paléoclimatologie et la morphogenèse sont indissociables au Quaternaire sur les 50000 dernières années. Les sites étudiés au Sahel et au Sahara présentent une certaine concordance des événements paléoclimatiques majeurs malgré la durée des phases plus ou moins importante.

Dans la région du fleuve Niger, les études des événements morphologiques et sédimentologiques sont rares. La reconstitution paléoclimatique est abordée à partir d'observations sur d'autres sites nigériens (Morel, 1981, 1986 ; Durand *et al.*, 1983 ; Dubar, 1988 ; Durand et Paris, 1986 ; Durand *et al.*, 1989 ; Durand et Langue, 1986 ; Blanck, 1986 ; Petit-Maire, 1988 ; Petit-Maire et Riser, 1986, 1983, 1987).

La vallée du Moyen Niger est dominée par un plateau d'aspect monotone de 250 m d'altitude. La vallée, d'un fond en auge, s'encaisse d'environ 80 m par rapport à sa surface. Les principales unités géomorphologiques actuelles sont les suivantes :

- **les cuirasses ferrugineuses** : qui se seraient formées à la fin du Tertiaire (Morel, 1981 ; Dubois *et al.*, 1984) constituent un massif tabulaire. A ses pieds s'étagent le talus d'éboulis, le glacis moyen (M2), le glacis inférieur ou bas glacis (M3) (Gavaud, 1977) ;
- **les terrasses alluviales** : après l'édification des cuirasses, les vallées se sont creusées, sans doute sous un climat tropical à saison sèche marquée provoquant des écoulements violents (Morel, 1983). Dans la vallée du Niger, aux environs de Niamey, 4 à 5 niveaux de terrasses ont été reconnus (Morel, 1983 ; Dubois *et al.*, 1984 ; Ousseini, 1986) (fig. I.3).



légende

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1 : socle | 2 : socle altéré (lithomarge) |
| 3 : continental terminal | 4 : bancs ferrugineux à oolithes |
| 5 : cuirasse ferrugineuse | 6 : sable |
| 7 : graviers | 8 : argile |
| 9 : encroûtement à tubulures | S : surface fini-Ct |
| R : replat structural | D : dune fossile |
| Ga : glacier ancien | Gr : glacier récent |
| T1, T2 : terrasses anciennes | T3 : terrasse moyenne |
| T4, T5 : terrasses récentes | |

Fig. 1.3 - Les terrasses alluviales dans la région de Niamey.

Les deux premières terrasses T1 et T2 sont respectivement à 40 m et 15 m du niveau actuel du fleuve. Ce sont des terrasses d'érosion couvertes de dépôts grossiers indurés par le fer. Ces terrasses prennent, le plus souvent, appui sur des niveaux à ooides ferrugineux du C.T.

Après l'Humide de 65000 à 40-50000 B.P., la région aurait subi une période aride. Ensuite une nouvelle phase humide durerait jusqu'à 22000-21000 B.P.

La construction de la terrasse T3 se serait passée pendant cette dernière période. L'entaille de T3 daterait de la reprise de conditions plus humides vers 17000 B.P. (Dubois *et al.*, 1984). Entre la fin de l'édification de T3 et le début de l'établissement de T4 (6000 B.P.), on ne trouve pas de trace de dépôts. La fin de l'édification de T4 a été établie vers 2200 B.P. (Ousseïni, 1986).

Les terrasses (T3, T4, T5) sont des terrasses d'accumulations emboîtées sans ferruginisation importante. Elles sont constituées de matériaux dont le calibre dénote une diminution générale de la compétence des eaux du Niger au fil du temps. Les sables des terrasses T3, T4 et T5, siliceux et très usés, sont issus du démantèlement des formations granitoïdes locales (Ousseïni et Morel, 1989).

La terrasse moyenne (T3) est formée par un dépôt graveleux à la base (galets de quartz, de cuirasse ferrugineuse et des roches régionales) et par des sables ou des matériaux plus argileux à son sommet. Vers Niamey, on note la présence de lentilles d'argile smectitique gris-vert témoignant de dépôts dans d'anciennes cuvettes d'inondation (Dubois *et al.*, 1984 ; Ousseini et Morel, 1989). Cet ensemble repose directement sur le socle.

Les deux dernières terrasses récentes T4 et T5 sont constituées de sables et de limons pour la T4, et d'argiles et de limons pour la T5, cette dernière étant actuellement inondable. Elles reposent parfois sur le socle.

- les dunes sont très abondantes en rive droite du fleuve Niger. Perpendiculaires à la direction des vents dominants (W.NW- E.SE), leur longueur peut atteindre 80 km, leur largeur 4 à 5 km et leur hauteur 25 à 45 m (Machens, 1973). Ousseini (1986) distingue plusieurs phases dans ces dépôts dunaires. Le dépôt D1 à la base et fossilisé, situé à la même époque que l'achèvement de la terrasse T2, correspondrait aux sables inférieurs de l'anté-Ghazalien (avant 40000 BP). Il comprend deux niveaux texturaux différents, indiquant qu'il y a eu plusieurs dépôts remaniés.

Les dépôts D2 et D3, bien individualisés formant le corps des cordons dunaires actuels et contemporains de l'édification de la terrasse T3.

Le dépôt D4 remodèle le sommet des systèmes dunaires et renforce le colmatage interdunaire. Les systèmes dunaires recouvrent les sols des glacis et tendent à cloisonner les koris.

- Les altérites : les formations du socle ont été, depuis le Paléocène, le siège d'une intense altération de type latéritique (Radier, 1957 ; Alzouna, 1982 ; Greigert, 1966, in Dubois *et al.*, 1984 ;). D'une roche dure, cassante, cristalline et très peu poreuse, les granites altérés donnent un produit rosâtre relativement poreux et perméable. Les schistes altérés sont d'aspect feuilleté et poreux mais peu perméable.

Selon Ousmane (1989), dans le Liptako, l'épaisseur des altérites varie de 3 à 30 m avec une moyenne de 17 m sur l'ensemble des formations. La puissance moyenne d'altération des granites (17,50 m) est supérieure à celle des schistes (16,60 m).

Les altérites ont été étudiées en tant qu'indicatrices pédoclimatiques par l'utilisation du déséquilibre U/Th (Dia, 1993). Mais c'est surtout leur intérêt hydrogéologique qui focalise l'attention. En effet, elles hébergent des nappes de 6 à 24 m de profondeur couramment exploitées par des puits villageois et seraient impliquées dans la recharge des nappes de fractures captées par des forages profonds (60 m) (Ousmane, 1984, 1989 ; Girard et Joseph, 1990 ; Girard, 1993).

L'entaille de la vallée du fleuve Niger expose, aujourd'hui sous le C.T., la succession kaolin, arènes granitiques et roches altérées. Les matériaux alluviaux vont reposer soit directement sur le socle ou son arène, soit sur une couche argileuse produite par l'altération du socle. Cet ensemble, qui ne dépasse guère 15 m, repose sur le socle sain.

Les franges altérées des différentes unités du socle constituent les zones d'échanges chimiques entre le socle sain et les couches superficielles. Les eaux souterraines, quoique peu minéralisées, vont y acquérir des compositions différenciées.

1.1.3 - Climat actuel

Le climat du Niger occidental appartient à la zone tropicale sèche. Il est du domaine sahélien (Leroux, 1983) ou de type sahélien pur (Rodier, 1975) ou encore du type III *semi-arid* de l'*African Zonation* de Griffiths (1972).

Les manifestations météorologiques sont liées aux translations latitudinales de la Zone Intertropicale de Convergence des Alizés entre le golfe de Guinée et le Sahara. Deux masses d'air, s'opposant par leur humidité relative, sont mises en jeu : l'alizé, continental, chaud et sec, prend naissance au dessus du Sahara, c'est l'Harmattan, l'air équatorial, frais et humide forme la Mousson.

Le Front Intertropical (FIT) atteint la latitude de Niamey la deuxième moitié d'avril. Son incursion précoce et temporaire courant mars apporte «la pluie des mangues» (Charres, 1974). Il faut attendre le mois de juin pour que s'installe effectivement la saison des pluies. L'ensemble des précipitations est apporté par un système nuageux de 500 à 800 km de long qui prend naissance dans la zone de convergence camerounaise ou centrafricaine (Baudet *et al.*, 1975, in Joseph et Aranyosy, 1988).

a) - Pluviométrie

La vallée du Moyen-Niger est comprise entre les isohyètes 400 mm au Nord-Ouest à la frontière malienne et 800 mm au sud à la frontière nigériane.

Les stations météorologiques de Niamey et Tillabéry reçoivent respectivement 596 mm de pluies en 56 jours et 466 mm en 46 jours. En général, il n'y a pas de corrélation entre les stations (Charres, 1974 ; Ousmane, 1988) avec cependant une grande variabilité interannuelle (fig. 1.4).

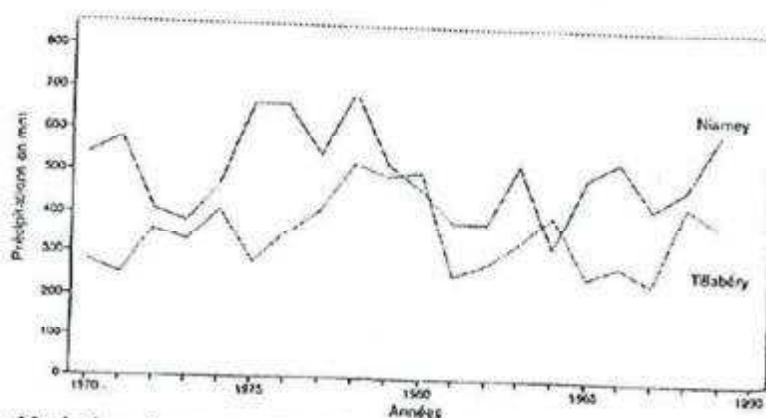


Fig. 1.4 : Variations interannuelles des pluies à la station de Niamey et à Tillabéry

L'analyse de la longue série de pluies de la station de Niamey montre l'absence de certitude d'une aridification du climat malgré le constat d'une baisse relative de la moyenne annuelle des précipitations

pendant la période 1962-1983 (533mm) comparée à celle de 1941-1970 (578mm) (Charre, 1974). On relève simplement, depuis 1905, l'alternance d'années sèches et humides. Les périodes sèches, par ailleurs de durée inégale, sont pour les plus connues : 1910-1920 ; 1931-1932 ; 1968-1973 ; 1980 à actuellement. Une régionalisation temporelle des précipitations annuelles sur toute la zone sahélienne, du Tchad au Sénégal, montre que l'on retrouve le même phénomène de baisse de pluviosité observé dans la région de Niamey (Beltraudo *et al.*, 1986).

La saison des pluies suit une répartition unimodale et est concentrée entre les mois de juin et de septembre (Environ 90% des pluies) avec un maximum en juillet-août. On note aussi que le régime des pluies, tout au long de la chronique, est d'une grande stabilité. Les intensités et les durées des averses journalières sont très importantes car elles vont influencer le comportement du sol (infiltration/ruissellement).

En région sahélienne, les pluies ont une durée inférieure à 24 h. La répartition de l'intensité des événements pluvieux lors du passage du grain est présentée comme suit : le front du grain a une intensité moyenne de 10 à 30 mm h⁻¹ et de courte durée, celle du corps du grain varie de forte à très forte intensité (40 à 100 mm h⁻¹) pendant 5 à 20 mm, enfin la «traîne du grain» correspond à une faible intensité (15-30 mm h⁻¹) et de durée allant de 30 mn à 2 h (ORSTOM, 1970 ; Babau, 1980). Malgré leur courte durée, les fortes intensités marquent fortement le comportement hydrologique des sols peu végétalisés de cette région.

b) - Températures

Entre Niamey et Tillabéry, les températures moyennes annuelles et mensuelles présentent de faibles variations (moyenne annuelle = 29°C et écart mensuel maximum = 4°C). En revanche, l'amplitude thermique journalière peut varier de 9°C à 18°C selon les saisons (Ousmane, 1988). Entre les deux stations, les températures mensuelles moyennes sont peu différentes mais sont systématiquement légèrement plus élevées à Tillabéry. Les faibles contrastes thermiques résultent d'un apport radiatif pratiquement égal tout au long de l'année et du passage de masses d'air à faible écart de température. Ainsi, le régime thermique moyen est caractérisé par deux maximums (mai-juin et septembre-octobre) et deux minimums (décembre-février et août). Pendant la saison des pluies, la température varie peu et se maintient autour de 35°C. D'octobre à février, le temps se rafraîchit et le mercure peut indiquer à Niamey 8°C la nuit. Le jour, la température oscille entre 25 et 30°C. L'Harmattan est responsable du changement de température. De mars à fin mai ce vent, qui souffle N à NE, apporte de fortes chaleurs et le mercure grimpe parfois à 50°C.

Quant à la température du sol, elle subit les mêmes variations saisonnières (tableau I.1). En effet, les températures moyennes les plus élevées sont enregistrées en avril. Les faibles valeurs sont relevées en janvier (période fraîche) et en juin (période d'installation de la saison de pluies). Pendant 7 à 8 mois, les horizons de surface des sols sont exposés à de fortes températures.

c) - Humidité relative

Dans la vallée du Niger, l'humidité relative dépend essentiellement de l'alternance des masses d'air Harmattan/Mousson. Cette humidité augmente progressivement de février à août pour atteindre plus de 80 % alors qu'en saison sèche, elle ne dépasse guère les 10 à 15 % entre septembre et janvier. De mars à avril, l'air est très sec avec une humidité de 4 %.

Après la saison de pluies, les valeurs de l'humidité relative vont, certes, fluctuer de manière importante mais demeureront faibles.

Tableau I.1 : Variations de la température du sol sur 1 m d'épaisseur à Tillabéry pendant les mois de janvier, avril et juin.

Mois	jan-98					avr-98					juin-98				
	surface	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	surface	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	surface	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm
1	36,4	32,2	30,2	29,2	30,8	46,2	40,5	37,5	34,5	34	47,5	39,2	39,2	38,7	38
2	38,4	32,4	30,5	29,5	31	47	42,2	38,8	34,6	34	42,2	39,8	39,4	38	38
3	36,7	33	30,1	29,5	31	48,7	43	38,8	35	34	42,2	37	37	37,4	37,8
4	38,7	32,4	30,6	29,8	31	49	43	39	35,6	34,3	40,5	41	39,8	37	37,2
5	35,5	30,1	29,4	29,5	31	49,4	42,5	39	35,5	34,4	43,5	37	38,6	37,5	37,2
6	35,5	29,8	29	29	30,8	49,2	42,5	39	35,6	34,5	44,4	38,2	37,4	36,3	37
7	37	30	29	27,8	30,5	49,2	42,7	39,5	36	34,6	41,4	41,7	40,8	36,5	37
8	31,2	38	29	28,5	30,4	48,8	42,8	38,7	36	35	46	40	39,6	37,5	37
9	34,1	31	29,2	20,5	30,2	49,5	43	40	36	35	45,8	38,8	38	37,2	37
10	34,8	30,1	29,5	29,7	30,2	48,7	43,4	40	36,4	35	40,4	42,2	41,2	36,8	37
11	33,5	30,3	29	28,5	30	50,2	44,5	41	36,7	35,2	42,7	43,8	42,4	37,5	36,8
12	37,7	30	28,8	28,5	30	50,2	44	40,6	37	35,5	46,2	33	34	37,5	37
13	31,6	29,4	28,5	28,2	30,2	50,4	43,6	40,3	37	35,8	33,6	29,5	38,5	35,5	37
14	31,6	30,2	28,5	28	30	50,8	43,8	40,7	37,2	35,8	43	40,9	40,2	36,5	36,8
15	34,5	30	28,8	28	30	50,5	44,8	41,2	37,2	36	44	42	41,2	37,3	36,8
16	32,7	30,5	28,7	27,8	30	51	43,8	41	37,4	36	45,2	35,2	35,2	37	37
17	35,4	30,8	29	27,7	29,8	50,8	45,2	41,5	37,3	36	36,5	38,9	38	35,8	36,9
18	36,2	30,5	28,6	27,8	29,8	50,7	45,2	41,8	37,5	36	43,3	40,4	39,5	36,5	36,3
19	33	30,5	28,6	27,7	29,8	51	39,6	38,7	37,8	36,8	44,5	40	39,6	36,8	36,5
20	34,4	30,8	29	27,7	29,7	51	40,3	38,4	37,4	36,4	42,4	41,8	40,8	37	36,8
21	34,5	31	28,8	27,8	29,8	45,5	38,8	37,8	37	36,2	46,3	38,8	37,8	36,8	37
22	34	31,2	29	27,7	29,3	41,5	39,4	38,2	36,8	36,2	42,5	39,5	38,7	36,8	37
23	36,6	32,2	29,5	27,8	29,5	44	40,1	38,4	36,6	36	41,5	41,5	40,8	37	36,8
24	38,6	33	30	28	29,3	46,5	43,6	40,2	36,7	36	45,6	42,6	41,5	37,6	36,8
25	39,4	33,2	30,3	28,3	29,2	50,2	44,2	41	37	38	46,6	39,8	39	37,8	37
26	39,8	34,2	31	28,5	29,4	51,5	44,5	41	37,4	36	46,6	40,5	40	37,5	37
27	42,5	34	31	28,8	29,6	49	43,5	40,6	37,5	36,4	43,5	42	41	37,6	37
28	42	35,6	32	29,2	29,8	49,8	44	41	37,5	36,5	48	39	38,2	37	37
29	46,3	36,1	32,7	29,6	30	49	44,8	41,3	37,5	36,3	40,5	41	40	37	37
30	45	36,2	33	30	30	48,5	48,4	48,4	38	36,7	43,7	41,8	41	37,5	35
31	46	36,3	33,2	30,5	30,2										

d) - Vents et brumes sèches

La dualité Harmattan-Mousson est caractérisée par un régime très venteux. Les brumes sèches se manifestent fréquemment. Elles sont dues aux stocks de particules solides en suspension dans l'atmosphère formés d'éléments argileux et sableux provenant des régions comprises entre l'Aïr (Niger), le Tibesti et l'Ennedi (Tchad) (Bertrand, 1976, 1977 ; Mc Tainsh et Walke, 1982). Les vents de vitesses supérieures à 20 km h⁻¹, capables de déplacer les sables, sont essentiellement de secteur nord et nord-est (Bagnold, 1960, *in* Ousseini, 1987). La mousson comporte près de 33 % de vents de même compétence et relèvent du secteur sud-ouest. Les vents de plus grandes vitesses (> 57 km h⁻¹) viennent toujours des secteurs nord à sud-est qui génèrent les chasses très efficaces dans le transport des sables à longue distance aux mois de mai et juin. Depuis la fin des années 1970, on assiste à une augmentation des brumes sèches et des vents de sables qui correspondrait à la baisse de la pluviométrie annuelle (Ousseini, 1986).

L'ampleur prise par les brumes sèches a suscité des études au nord Nigéria et Tchad (Pye, 1987) au nord Ghana (Tiessen *et al.*, 1991) et au Niger (Drees *et al.*, 1993).

Les apports de poussières sont compris entre 50 et 220 kg ha⁻¹ an⁻¹. Les stations nigériennes, proches de la vallée du Niger, affichent la valeur moyenne de 112 kg ha⁻¹ an⁻¹. Les minéraux communs dans ces aérosols sont la kaolinite, le quartz, le mica et les feldspaths. Les minéraux spécifiquement signalés sont l'illite (Hauffe, 1989 *in* Tiessen *et al.*, 1991), de l'apatite et de la chlorite en faible quantité (Wilke *et al.*, 1984), des cristaux d'halite et de la calcite et des smectites en faibles proportions particulièrement à la station nigérienne de Chical dans le Dallol Bosso (Drees *et al.*, 1993).

e) - Evaporation et évapotranspiration

L'évaluation correcte de ce paramètre climatologique pour la région sahélienne est importante pour son utilisation rationnelle la bonne gestion des réserves hydriques. L'évaporation sous abri (Piche) est de 3175 mm an⁻¹ à Niamey et 3010 mm an⁻¹ à Tillabéry.

L'évaporation sur bac Colorado est encore plus élevée avec 3689 mm an⁻¹ pour Niamey et 4200 mm an⁻¹ à Tillabéry (Charre, 1974 ; Guéro, 1987). Elle varie au cours de l'année selon l'humidité relative de l'atmosphère.

L'évapotranspiration potentielle (ETP), selon la formule de Turc, suit le même régime que l'évaporation au bac. L'ETP représente ici le tiers de cette dernière. Avec la formule de Thornwaite, on se rapproche des valeurs d'évaporation sur bac sauf pour la période hivernale où l'E.T.P. semble sous-estimée (Charre, 1974).

Le bilan hydrique climatique actuel étant négatif, l'altération des roches du socle serait pratiquement bloquée. Les matériaux pédologiques, dans la vallée du Moyen Niger, sont constitués d'apports arrachés aux anciennes altérations hydrolytiques. Les agents d'érosion, eau et vent, remanient perpétuellement ces formations pédologiques fragiles particulièrement dans leur partie superficielle.

Les processus mécaniques induits par le climat tropical sec, géochimiquement peu agressif, peuvent masquer toute évolution pédologique récente.

I.2 - DESCRIPTION DES SITES

Dans ce cadre général, bien représentatif du Moyen Niger, trois secteurs comportant chacun un périmètre irrigué ont été retenus. Ils sont distribués d'amont en aval dans la vallée alluviale du fleuve. Ce sont les périmètres de Tillakaina, Sona et de Kollo (fig. 1.5). Par rapport à la capitale Niamey, les deux premiers sites sont respectivement à 115 km et 80 km au nord, et le troisième à 40 km au sud-est.

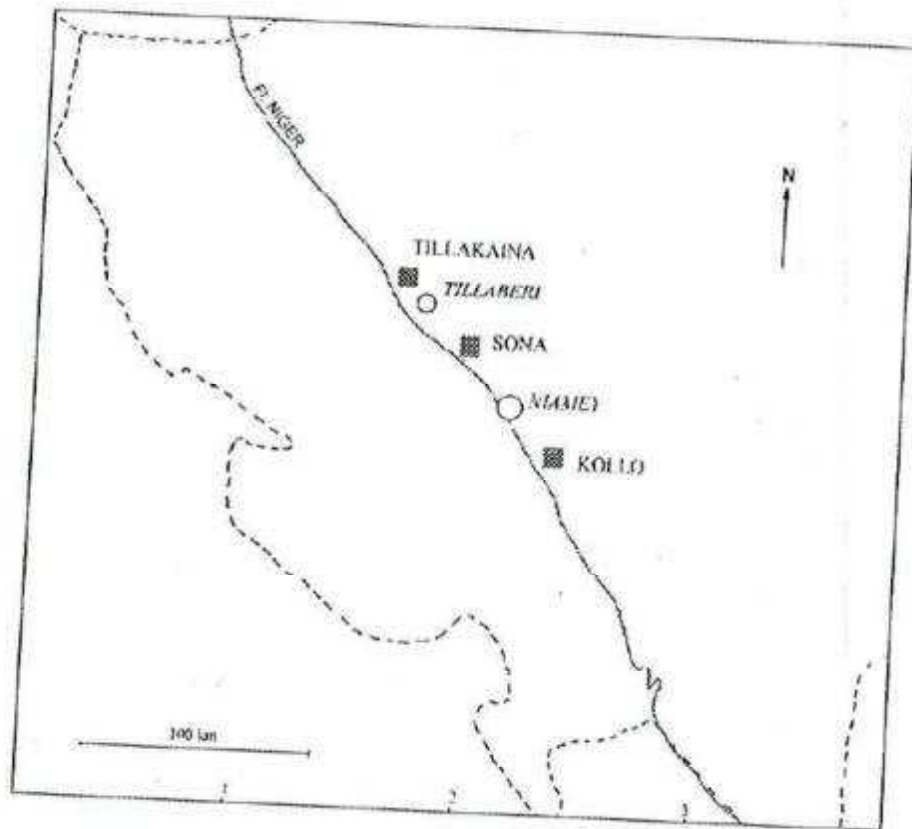


Fig. 1.5 : Localisation des sites étudiés

I.2.1 - Le site de Tillakaina

a) - Description du périmètre

Le périmètre de Tillakaina est situé sur la terrasse T3 en rive gauche entre le fleuve et la Route Nationale n°8 (RN8) qui mène au Mali. Il est à 115 km de Niamey soit 5 km de Tillabéri chef lieu du département de même nom.

Le périmètre a une superficie de 100 ha dont 70 furent aménagés en 1967 et leur mise en culture irriguée débuta en 1968. Réhabilité en 1981, le périmètre a connu une extension de 25 ha en 1987. La superficie exploitée est divisée en parcelles de $\frac{1}{2}$ ha. Le périmètre produit essentiellement des légumes prévus pour l'exportation dans des parcelles divisées en micro-bassins et irriguées à la raie.

A la conception de l'aménagement hydro-agricole, les techniciens voulaient un réseau robuste et facile d'exploitation. Les canaux étaient en terre et il s'en est suivi une rapide dégradation. Les canalisations

principales et secondaires furent bétonnées en 1970. Une perte d'eau pendant le transport se produit malgré tout, principalement, le long des arroseurs demeurés en terre. Par contre dans l'extension, l'eau est acheminée par conduite enterrée (système californien).

Les collatures d'évacuation des excédents d'eau sont colmatées faute d'entretien. Un fossé de garde et une digue protègent l'aménagement des eaux de ruissellement du bassin versant.

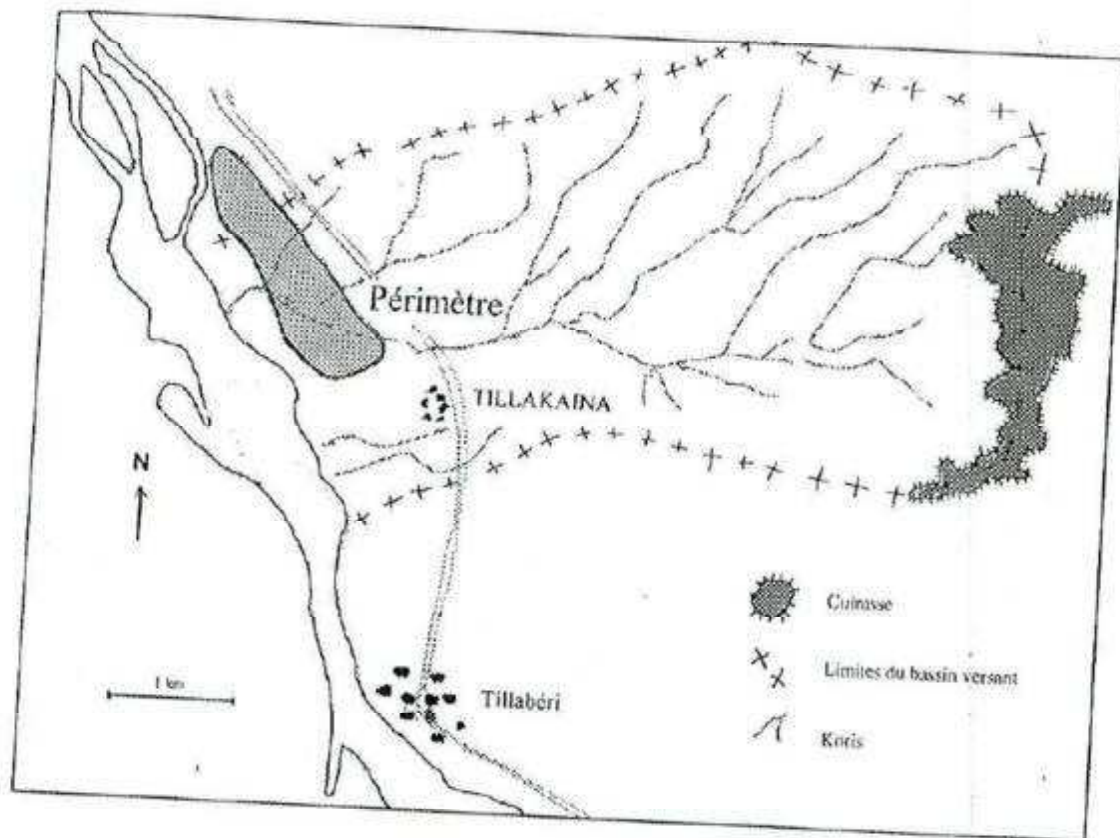


Fig. I.6 : Carte du bassin versant de Tillakaina.

b) - Géologie locale

Dans le bassin versant, les deux principales formations sont :

- l'une d'origine sédimentaire : elle a une faible occupation spatiale et est constituée principalement par des schistes en association avec des quartzites. Ces schistes sont souvent des interstratifiés dans des roches vertes ;

- l'autre, d'origine magmatique, est composée par des roches vertes, granites et gabbros intrusifs. Les roches vertes, abondantes dans le secteur, comportent des hornblendites, des metabasaltes et de métagabbros. Ces derniers forment de petites collines de roches très dures, massives, à grains grossiers et à structure doléritique. Leurs principaux minéraux sont l'actinote, l'épidote et souvent la chlorite. Les para-amphiboles se présentent sous forme de bancs ou lentilles de faible extension. On les trouve toujours isolées à

l'extérieur des roches vertes. Ces para-amphibolites sont fraîches et contiennent des feldspaths et surtout des cristaux d'amphibole.

Les granites du Liptako, terme générique, englobent une grande variété de roches granitisées. Dans la région de Tillabéry, on relève les granites à biotite au centre des massifs et les granites à amphiboles, à grains moyens en bordure des roches vertes.

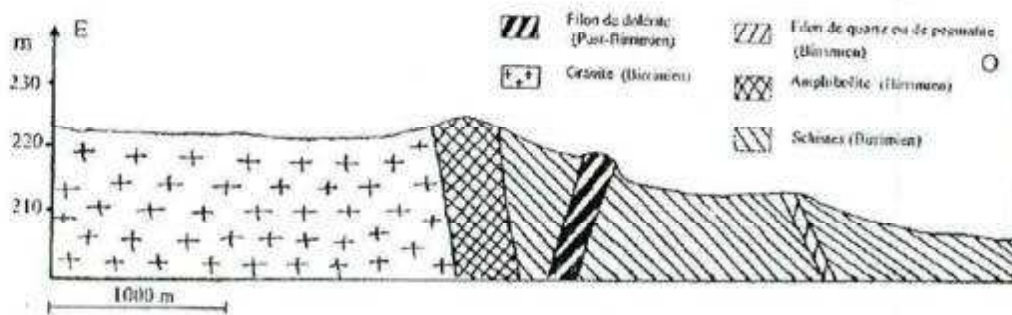


Fig. 1.7 : Coupe géologique de Tillabéry

Les gabbros intrusifs sont les formations les plus jeunes. Ils correspondent à des venues intrusives basiques. Bien que fréquents, ils sont en petits massifs ou filons de faible étendue. Ils sont aussi considérés comme des gabbros doléritiques non métamorphiques de teinte vert sombre pouvant contenir de la pyrite.

Quelques observations minéralogiques au microscope optique ont été menées sur des roches fraîches du bassin versant. Elles sont complétées par des analyses chimiques totales selon la méthode Jeanroy (1974) dont les résultats sont enregistrées dans le tableau I-2.

Tableau I-2 : composition chimique de quelques affleurements rocheux (% d'oxydes)

Echantillons	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	H ₂ O
TK1	51,55	13,14	14,77	0,2	5,33	7,98	2,22	0,55	1,04	2,01
TK2	57,86	15,95	12,62	0,2	4,26	0,32	1,48	0,81	0,77	6,11
TK3	60,58	16,71	6,68	0,1	2,58	5,87	3,49	1,09	0,64	2,59
TK4	54,86	13,39	15,20	0,2	2,35	4,47	2,60	1,76	1,62	3,54
TK5	52,04	4,07	10,22	0,2	18,65	11,50	0,35	0,14	0,57	2,83
TK6	52,14	4,46	8,95	0,2	20,75	9,25	0,30	0,17	0,53	3,37

TK1 à TK4 : granodiorites plus ou moins altérés ; TK5 et TK6 : amphibolites.

Selon les échantillons rocheux analysés, en moyenne, le magnésium présente la plus forte proportion (9 %) suivi du calcium (6,60 %). Le sodium ne constitue que 1,70 % soit une teneur 9 fois plus petite que Ca + Mg. La teneur en potassium est la plus faible.

c) - Unités géomorphologiques du bassin versant

Novak (1987), à partir de photographies aériennes, a proposé une reconstitution du déroulement probable des événements érosifs du bassin versant. Les unités géomorphologiques s'ordonnent ainsi qu'il suit :

- au sommet, la cuirasse ferrugineuse coiffe les grès argileux du Moyen Niger. Cette surface, peu perméable, génère une importante quantité d'eau de ruissellement qui va alimenter les ruisseaux. La pente du talus étant très forte, les eaux gagnent leur énergie érosive dans les parties hautes ;
- le glacis fonctionnel comprend deux parties. La partie supérieure est constituée de colluvions caillouteuses issues de la cuirasse et des grès du Moyen Niger. Sous ce haut glacis érodé, se trouve une carapace ferrugineuse continue. Le bas glacis, qui s'étend sur 3 km en amont de Tillakaina, a une pente de 2 à 3% et paraît moins érodé. Les nombreux affleurements rocheux y impriment un micro-relief ondulé. Le glacis se raccorde en biseau à la terrasse moyenne T3. Le contact, peu net en raison des travaux d'aménagement, est une zone de glacis-terrasse qui se situe entre la RN8 et le canal principal du périmètre ;

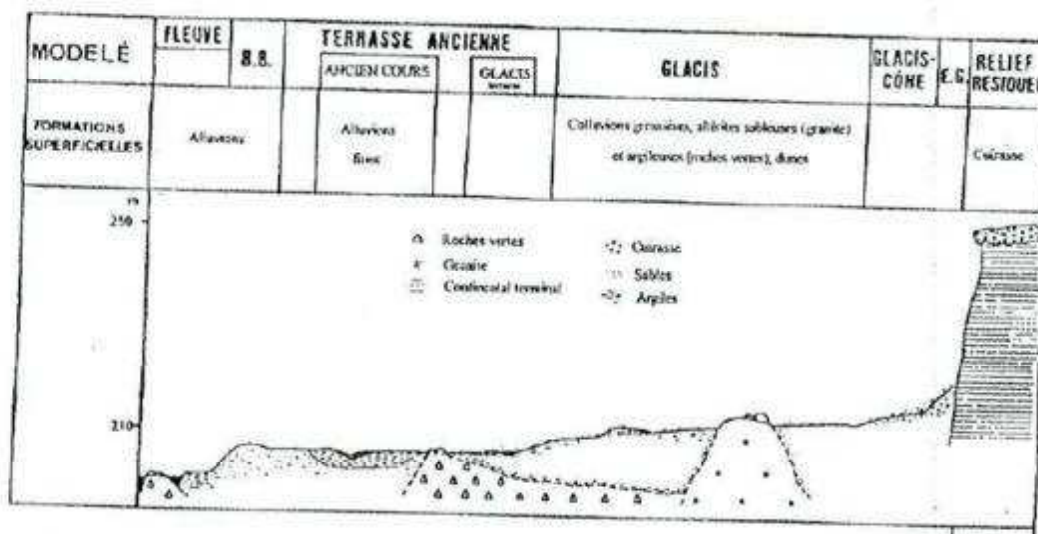


Fig. 1.8 : Coupe géomorphologique de Tillakaina

- les formations sableuses sont constituées de placages éoliens contre les lambeaux de « chaînes rocheuses » ayant résisté à l'érosion. Ainsi ces édifices dunaires ont une configuration en large dôme avec des émergences rocheuses granitiques. Orientées E-W et de pente d'environ 3%, ces dunes couvrent une importante surface en amont de Tillabéry ;
- la terrasse moyenne (T3) est comprise entre 215 et 205 m et parsemée d'affleurements du socle. Ces barres rocheuses en hauts fonds ont créé de petits bassins où se sont déposées les alluvions du fleuve et des koris latéraux dont les eaux descendent les surfaces cuirassées.

d) - Etudes précédentes et aménagement

En 1974, la SOGETHA a établi une carte morphopédologique à l'échelle de 1/50000 des terrasses et glacis de la région de Tillabéry en vue de la culture irriguée de canne à sucre. On y relève des sols peu évolués d'érosion, des sols bruns subarides, des sols hydromorphes à gley, des vertisols et des sols calcimagnésiques sur altérites des para-amphiboles et de nombreuses associations de sols. Les vertisols ainsi que les sols calcimagnésiques sont peu étendus. Par rapport à la carte de Gavaud et Boulet (1965), la SOGETHA a introduit les deux dernières classes.

En 1981, L'INRAN a dressé une carte (1/5000) des sols du périmètre irrigué de Tillakaïna. La classe des sols isohumiques renferme 10 séries établies à partir des critères de profondeur, de texture, de caractères vertiques ou alcalins qui influencent l'aptitude à l'irrigation gravitaire. Les vertisols sont devenus une association « sol isohumique à faciès vertique ».

En 1987, Novak a repris l'étude des parcelles abandonnées du même périmètre. La charge sodique relevée dans la plage inculte est interprétée à travers la reconstitution morpho-hydrodynamique de la terrasse pour mieux comprendre la mise en place des matériaux pédologiques. En effet, la SOGETHA (1974) et l'INRAN (1981) avaient constaté des faciès alcalinisés sans pour autant argumenter leur origine. Bien que son approche soit intéressante, Novak a préféré abandonné le champ pédologique au profit des considérations agronomiques

La carte d'aptitude à l'irrigation (INRAN, 1981) a été déduite de la carte pédologique. Les terres jugées inaptes sont constituées de Lithosols, Régosols et de sols marqués par une certaine sodicité. Cette dernière s'exprime nettement dans les parties les plus proches du fleuve

L'Institut International de Management de l'Irrigation (IIMI) (1996) a relevé, sur ce périmètre, un manque d'équité dans la distribution de l'eau à cause d'une organisation insuffisante des exploitants et l'abandon des parcelles dégradées sur certains arroseurs. Il est clairement établi que certaines parties reçoivent plus d'eau que leurs besoins et conséquemment d'autres souffrent de son insuffisance.

Une proposition d'amélioration du tour d'eau s'est heurtée au refus de certains membres du bureau de la coopérative. En fait, cette déficience de la gestion de l'eau pose le problème de la gestion des ressources de la coopérative tout court : en absence de rigueur dans la planification et la conduite de la campagne de production, les ventes des denrées, prévues pour l'exportation, sont orientées sur les marchés de Niamey. Il est évident qu'un tel contexte masque aux producteurs l'intérêt d'une bonne gestion des sols irrigués.

Rappelons aussi que l'expérimentation de la canne à sucre dans la région s'est heurtée très tôt aux contraintes d'infiltration d'eau (Valet, 1975).

De cet exposé sur les études antérieures, il apparaît des contraintes édaphiques et de gestion de l'eau sur le périmètre de Tillakaïna en relation avec les propriétés des sols qui contrôlent les divers fonctionnements pédologiques.

En 1992, une nouvelle approche à très grande échelle dans le cadre d'une action AUPELF-FICU, a été mise en œuvre. Au total, 8 profils ont été creusés dont la localisation est illustrée par la figure I.9. L'étude est basée sur un transect qui va du bas glacis aux abords du lit mineur du fleuve.

On note que les profils TK36 et TK35 sont situés sur le bas glacis dans d'anciennes parcelles expérimentales de l'INRAN (Valet, 1979). Ces parcelles ont connu un développement très hétérogène de la canne à sucre (bon en TK36 et mauvais en TK35). Les profils TE4 et TE5 sont situés en partie haute de la terrasse dans le sous périmètre « extension », TO1, au cœur du premier sous périmètre. Le profil TO3, au pied de l'extrémité E de la barre rocheuse, est implanté dans une parcelle couverte d'efflorescences salines blanches et les plantes apparaissent stressées par les conditions édaphiques. Les profils TO2 et TO6 sont situés en zone non aménagée proche du fleuve. De plus TO6 est à côté de l'extrémité ouest de la même barre rocheuse.

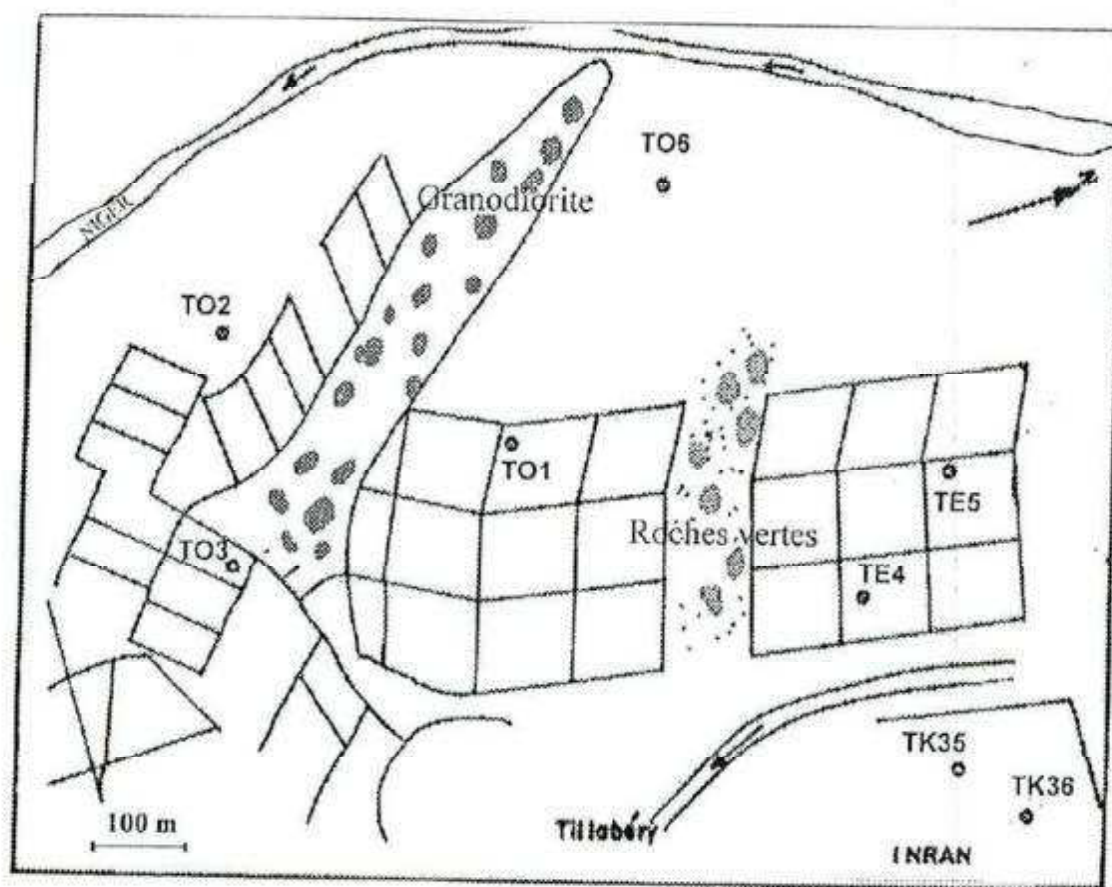


Fig. I.9 : Localisation des profils pédologiques.

I.2.2 - Le site de Sona

a) . Description du périmètre

Le périmètre irrigué de Sona, de la localité du même nom, est situé sur la rive gauche du fleuve à 85 km de Niamey sur la route nationale 8 (RN8). Il est installé sur la terrasse T3 située 5 m environ au dessus du fleuve. Le matériau originel est constitué d'alluvions très hétérogènes déposées par le fleuve. La terrasse, quasi plane, serait un bras mort du fleuve se faulant entre les bourrelets sableux. Ces alluvions sont brun-jaunâtre en surface et grises en profondeur et reposent sur un sable alluvial clair.

La mise en valeur du périmètre de 40 ha (sur 80 ha prévus), divisés en parcelles de 1/2 ha, a démarré en 1987 sous forme de projet pilote de recherche-développement. Ce dernier était supervisé techniquement par l'IRAT. Son exploitation a été confiée aux paysans qui pratiquaient la polyculture (cultures vivrières et de rente) pour bâtir des modèles d'unités d'exploitation viables. Il s'agissait aussi de tester l'efficacité de certains systèmes d'irrigation et matériel de culture attelée (traction animale).

b) - Géologie locale

Le bassin versant (fig. I.10) est constitué uniformément de granodiorites. Les affleurements y sont nombreux et les altérites sont exposées à la faveur de l'érosion hydrique linéaire (*koris*) depuis le talus jusqu'au bas glacis. Dans la terrasse, les affleurements se raréfient beaucoup plus. Il n'existe pas d'études pétrographiques détaillées du secteur. Les rares observations rapportent des granites à amphibole et à biotite (Guéro, 1987).

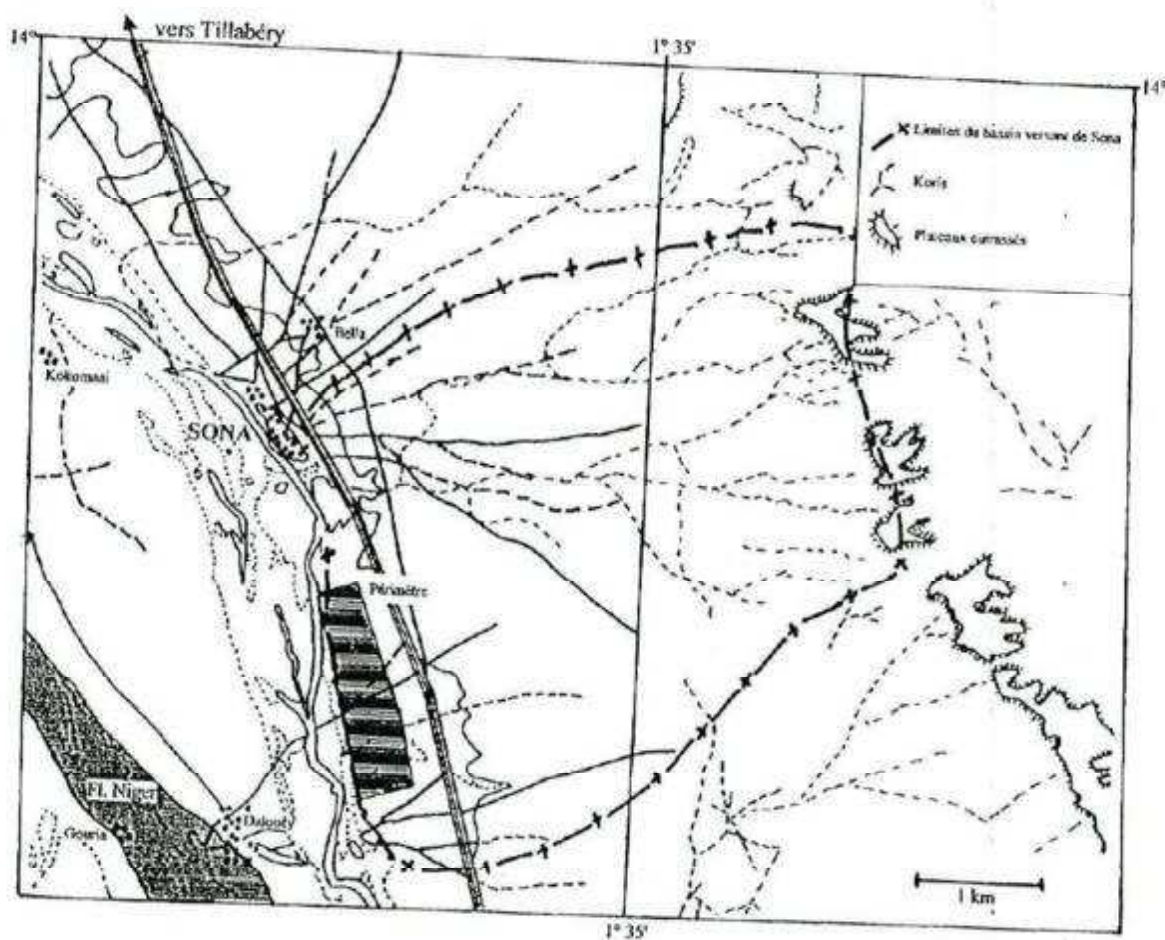


Fig. I.10 : bassin versant de la région de Sona-Lossa

Quatre échantillons d'altérites ont été prélevés dans le secteur :

- **Lossa1** provient d'une diorite très altérée. Poudreux, et de couleur blanc jaune, cet échantillon a été prélevé sous la cuirasse de la butte située au sud-est de la station INRAN de Lossa ;

- **Lossa2** a été pris de la fosse pédologique étudiée par Barbiéro au sein de la station INRAN. Les **feldspaths altérés** lui confèrent une couleur blanche et on note aussi des **micas** ;
- **Sona1** est prélevé sur un **granodiorite altéré** en boules en amont du périmètre de Sona ;
- **Sona2** est issu d'un granite localisé en amont et à 5 km de Sona soit 90 km de Niamey.

Tableau I-3 : Composition chimique des échantillons d'altérites de Sona

Echantillons	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	H ₂ O
Lossa1	67,07	16,66	3,82	0,19	0,43	1,11	2,19	1,4	0,4	6,39
Lossa2	66,62	14,61	2,59	0,07	0,91	4,66	3,65	0,66	0,35	5,82
Sona1	60,84	20,33	4,06	0,07	1,4	4,14	5,75	1,02	0,62	1,48
Sona2	67,39	17,44	1,98	0,04	0,47	2,41	4,86	1,81	0,39	1,93

Géochimiquement, le bassin versant de Sona présente des altérites où prédomine le sodium suivi du calcium et du potassium, le magnésium étant en faible proportion.

c) - Unités géomorphologiques du bassin versant

Lorsqu'on se déplace des plateaux cuirassés vers le fleuve, sur environ 5 km d'est en ouest, on note les unités suivantes (fig.I.11) :

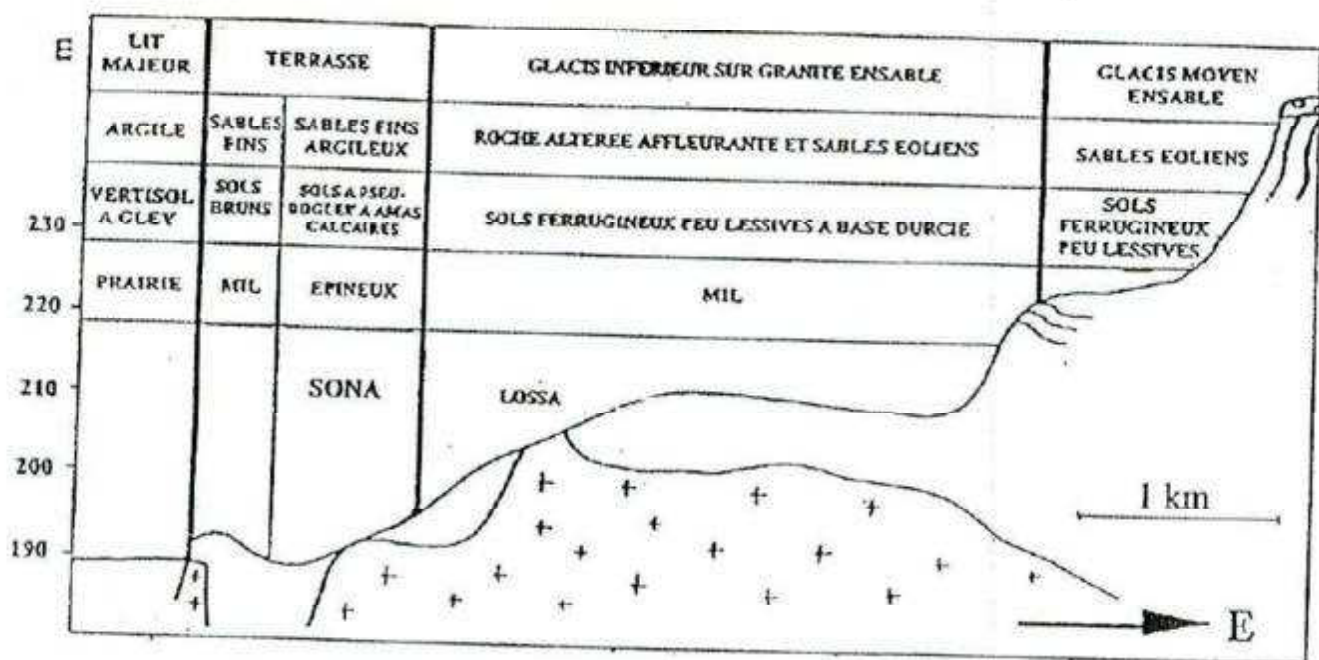


Fig. I.11 : Coupe géomorphologique de Sona

- un relief tabulaire cuirassé qui culmine à 270 m. La cuirasse ferrugineuse a un faciès plutôt pisolithique avec une matrice réduite en partie supérieure. Un peu plus bas, cette matrice devient abondante et offre des teintes vives rouge-sang à violacées ;
- le talus, très escarpé, expose le contact Continental terminal-socle altéré. Le démantèlement actif de la cuirasse y laisse un pavage de blocs. C'est ici que les eaux ruisselantes acquièrent leur forte énergie érosive ;

- les jupes sableuses rouges sont au pied du versant. Elles sont aujourd'hui la proie d'une forte érosion ravissante pendant la saison des pluies relayée par l'érosion éolienne en saison sèche. Un concrétionnement de fer à leur base témoignerait de l'émergence de nappes. Le bourrelet de berge, entrecoupé par les koris, est aussi formé de sable. Il constitue la bordure est de la terrasse T3 à la côte 200 m ;

- sur le glaciais fonctionnel très érodé, le socle s'expose en plusieurs affleurements. Il s'agit de boules de granodiorite dont l'altération, sous les conditions climatiques actuelles, libère un matériel en pelures.

d) - Etudes précédentes et aménagement

En 1976, Féau a établi une carte pédologique de la terrasse de Sona. Il souligne les discontinuités texturales aussi bien en surface qu'en profondeur. Il a identifié une dizaine d'unités de sols marquées, dans leur quasi totalité, par des traits d'hydromorphie (gley et pseudogley). Une nappe alluviale a été signalée dans la zone nord du périmètre où Valet (1982) définit un sol hydromorphe à gley de nappe. Toutefois, lors des différentes campagnes de terrain, cette nappe n'a jamais été rencontrée, quelque soit la saison, donc non fonctionnel. Il est probable que les caractères « hydromorphes » ne soient que des traits relictuels d'une hydromorphie ancienne.

Pour la mise en valeur de la terrasse, une carte d'aptitude des sols à l'irrigation a été établie à partir de déterminations *in situ* de la densité apparente et de cinétiques d'infiltration au double anneau et l'humidité du sol fut suivie à la sonde à neutrons (Valet, 1988). La plupart des sols présentent des caractéristiques peu favorables à l'infiltration de l'eau (Valet, 1988) : la structure non à peu développée, la compacité (densité apparente comprise de 1.60 à 1.80) et l'indice d'instabilité structurale compris entre 3 et 4 (Hénin, 1976) sont élevés. La profondeur humectée varie de 30 à 80 cm avec tendance à l'engorgement. 67 % de la superficie de la terrasse présenteraient une aptitude médiocre à l'irrigation. Ces déterminations hydrodynamiques sont intervenues après l'aménagement d'une partie de la terrasse en périmètre irrigué en 1987 où une très grande hétérogénéité de la productivité est apparue. Cette hétérogénéité fut attribuée aux mauvaises caractéristiques physiques du sol (Bozza et Boyer, 1988 ; Aubert, 1988 ; Valet, 1989). Le paramètre sol fut dès lors reconnu comme facteur limitant.

Les résultats obtenus du projet n'ont pas encouragé le financement d'une seconde phase et le périmètre a été abandonné en 1990.

De cette présentation du périmètre de Sona, on déduit que les différentes études pédologiques ont mis principalement l'accent sur les traits morphologiques et les paramètres hydrodynamiques. La faiblesse des déterminations chimiques et minéralogiques tend à négliger leur rôle sur l'organisation et corrélativement sur le fonctionnement hydrodynamique des sols de la terrasse de Sona.

La présente étude est entreprise selon la même démarche qu'à Tillakaïna. Au total, il a été ouvert et étudié 9 profils pédologiques (fig. I.12).

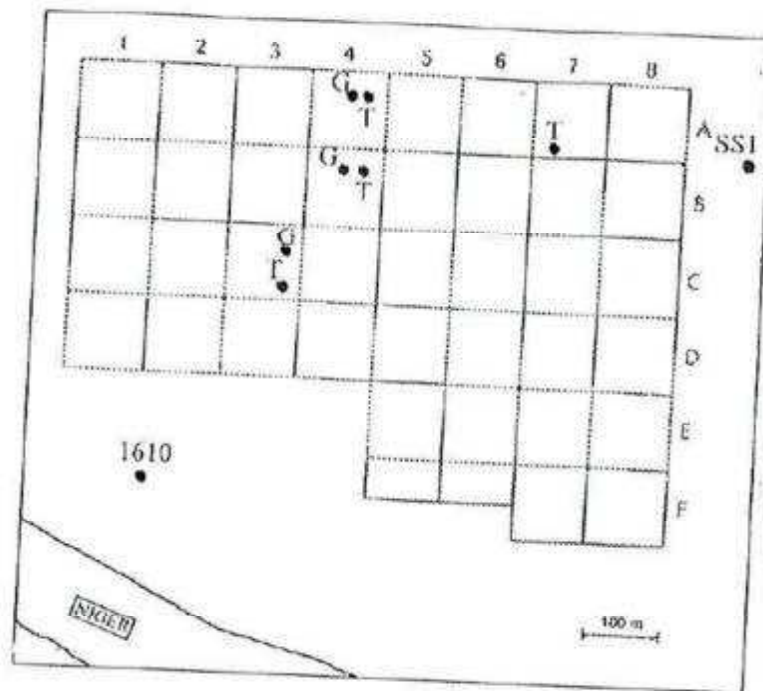


Fig. 1.12 : Localisation des profils étudiés.

Sept profils pédologiques sont ouverts dans le périmètre et deux hors de celui-ci.

1.2.3 - Le site de Kollo

Le site de Kollo est situé à une quarantaine de kilomètres au sud de Niamey. Le bassin versant est fortement raviné par des koris qui naissent au pied de la cuirasse à la faveur de nombreuses sources (fig. 1.13).

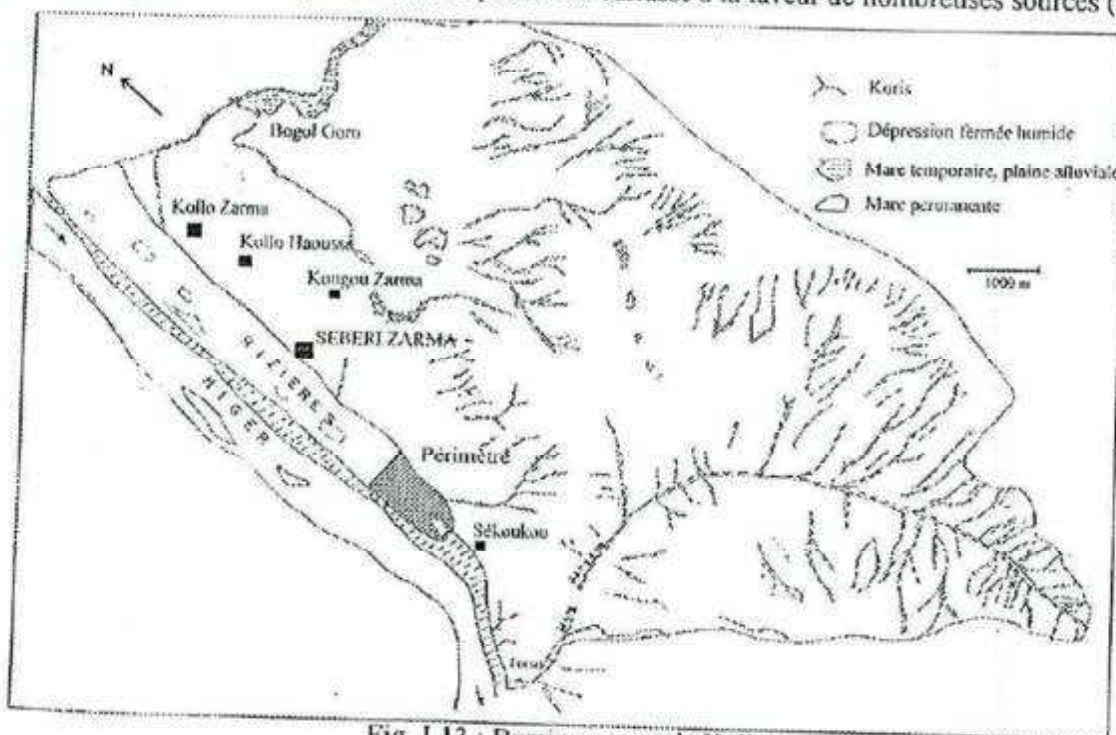


Fig. 1.13 : Bassin versant de Kollo

a) - Description du périmètre

Le périmètre de Kollo est situé sur la terrasse T4 communément appelée cuvette. Avant son aménagement, la terrasse était exploitée en riz flottant et sorgho de décrue.

Depuis 1984, 380 ha ont été aménagés pour la riziculture intensive (2 campagnes par an) dans des casiers de ¼ ha. Le périmètre est découpé en 6 quartiers hydrauliques correspondant aux groupements mutualistes de production (GMP). Ces groupements sont des structures organisationnelles des producteurs, pour la gestion des différentes composantes du périmètre dont l'eau d'irrigation. Mais cette dernière est mal gérée, particulièrement au GMP3, en raison du non respect du tour d'eau et de l'éloignement de la station de pompage. En effet, l'eau pompée du fleuve descend, par gravité, le canal principal sur une distance de 4 km pour atteindre le GMP3 où se trouve la zone étudiée.

Le réseau de drainage, constitué de rigoles peu profondes (20 à 30 cm) à ciel ouvert, évacue les eaux de vidange des parcelles, l'excédent d'irrigation et le ruissellement en saison de pluies. En bordure ouest se trouve la collature qui achemine les eaux usées vers le fleuve. Dans ce réseau de drainage, le concepteur y a intégré les mares préexistantes pour la pisciculture. Dans la zone étudiée, la collature longe la digue qui protège le périmètre contre la crue du fleuve. Toutefois ce réseau d'assainissement est très enherbé par manque d'entretien.

b) - Géologie

Dans le secteur de Kollo, aucun affleurement rocheux n'a pu être répertorié en raison de la grande épaisseur des formations superficielles. Le socle altéré n'est observé qu'à la faveur du creusement linéaire des koris (fig. I.14).

c) - Unités géomorphologiques du bassin versant

D'une manière générale, le paysage est relativement plat. La disposition des terrains est indiquée sur la figure I.14.

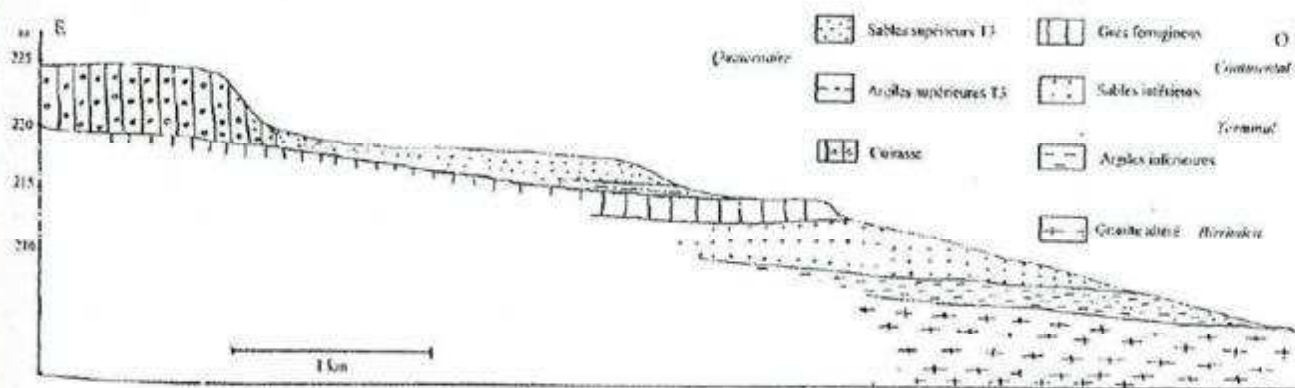


Fig. I.14 : Coupe géologique de Kollo

Les formations du Quaternaire sont largement prépondérantes.

Les jupes sableuses, en remontant le talus, s'adossent sur le grès ferrugineux du Continental.

Le glacis, riche en loupes d'érosion, est élaboré sur le CT, d'où le caractère ferrugineux des sols.

Dans le bassin versant, il existe aussi des buttes témoins où le CT a une épaisseur de 20 à 30 cm. Le CT forme donc une couche repère. On note alors sur et sous le CT des sables et argiles supérieurs d'une part et inférieurs d'autre part.

Le complexe lithologique de socle fracturé en profondeur constituerait un bon réservoir d'eau alimenté par les *koris* en surface. A cet égard, une source a été relevée à la rupture de pente entre le bas glacis et la terrasse T3. Elle correspondrait aux zones humides des cartes topographiques (I.G.N., 1981) déjà signalées par Joseph et Ousmane (1987) dans les environs de Niamey. En fait, cette rupture de pente est marquée par une dépression creusée par l'axe de drainage d'un ruisseau. Les sources laissent supposer l'existence de fractures et de couches plus ou moins inclinées favorables à un drainage des eaux souterraines dans le sens de la pente générale.

Dans le secteur de Sékoukou proche du fleuve, les argiles et les sables inférieurs sont absents et le C.T repose directement sur le socle altéré. Quant aux argiles supérieures, elles forment une structure en biseau disparaissant vers l'est. Les sables supérieurs viennent alors directement en contact avec le CT.

La terrasse T3 est recouverte de sables éoliens. La texture des sols de cette terrasse varie de moyenne à fine en surface et dans les horizons intermédiaires. A la base se trouve une texture grossière riche en concrétions ferro-manganiques rattachées à un ancien battement de nappe. La couleur générale varie de brun sombre à brun jaunâtre ponctuée de taches d'oxydoréduction.

La terrasse T4 a une texture fine reposant sur un lit de gravillons roulés. La couleur dominante est le gris dans les horizons superficiels et intermédiaires. En profondeur, elle apparaît bleu verdâtre traduisant l'état réduit du fer (gley) ou fortement marquée par des taches de couleur rouge à rouille. Les sols de la terrasse T4, particulièrement la partie affectée par les sels, feront l'objet d'une étude spécifique.

d) - Etudes précédentes et aménagement

L'analyse de la documentation existante, constituée par les rares documents pédologiques relatifs à la terrasse T4 du secteur de Kollo, se résume à la carte pédologique à 1/500000 de l'ORSTOM (Gavaud et Bocquier, 1967) et l'inventaire à 1/200000 des cuvettes aménageables (Ifagraria, 1964). A ces échelles, l'information pédologique est inadaptée à la conception des aménagements hydro-agricoles. Tous les aménagements hydro-agricoles en rive gauche, situés entre Niamey et Kollo, ont été implantés sans étude appropriée de sols.

Au cours de la réhabilitation du périmètre en 1987, il est apparu un abandon d'une trentaine d'hectares où le riz ne pousse pas à cause de la présence de sels. Pour pallier ce manque d'informations pédologiques dans le bassin versant, une prospection semi-détaillée a été menée (Guéro et Ambouta, 1988 ; Seyni, 1994). Sur le périmètre des sols hydromorphes minéraux : les sols hydromorphes à pseudogley, à gley et hydromorphes à gley salins ont été identifiés.

On retiendra que la terrasse T4 de Kollo présente des sols avec une nappe, située entre 1,20 et 1,40 m, à leur base. Le profil pédologique est marqué par des efflorescences salines en surface, par des taches d'oxydo-

réduction du fer et des sels précipités dans les horizons profonds. Cette présence simultanée d'eau, de sels et des taches d'hydromorphie confère l'actualité de la dynamique des sols de la terrasse T4.

Un nombre important d'observations à la tarière ont été réalisées dans cette partie du périmètre. 11 profils ont été ouverts (fig. I.15). Pour les analyses de laboratoire, deux profils sont retenus : l'un dans la zone salée et le second en dehors du périmètre et apparemment non salé.

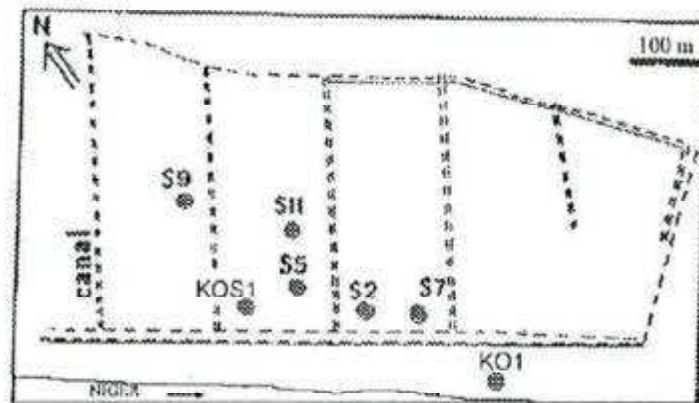


Fig. I.15 : Localisation des profils

I.3 - CONCLUSION

Le Quaternaire est perçu comme une succession de périodes humides (phase de pédogenèse active) et sèches (phases érosives). Le climat actuel, marqué par un bilan hydrique négatif, s'est installé depuis les 4-5 derniers millénaires. L'action morphogénétique de ces variations climatiques a élaboré les différentes terrasses du fleuve Niger au Pléistocène moyen et inférieur.

Les terrasses T3 et T4 étaient des milieux d'accueil des matières en suspension des eaux maliennes et des ruisseaux locaux arrachant les matériaux ferrugineux et altéritiques des parties supérieures. Leurs matériaux pédologiques ont dû subir un climat contrasté semblable à l'actuel depuis leur mise en place. L'existence de phases humides a permis l'élaboration des nodules calcaires.

Sur ces terrasses T3 et T4 sont implantés des périmètres irrigués. Des contraintes édaphiques sont apparues après la mise en exploitation et n'ont pas encore reçu suffisamment d'explications d'ordre pédologique. Les difficultés résideraient, pour les sols des terrasses T3 et T4, de faire la part des héritages, des processus évolutifs actuels et de leurs interactions avec l'irrigation.

L'analyse géologique fait apparaître des différences entre les 3 sites :

- A Tillakaina, des roches vertes comprenant des metabasaltes et des métagabbros sont majoritaires ;
- A Sona, le substratum du bassin versant est de granodiorites à hornblende et de granites

- Kollo est marqué par les matériaux ferrugineux du quaternaire.

Du point de vue géochimique, les trois sites sont corrélativement différenciés. Les roches de Tillakaina renferment plus de magnésium et de calcium que les altérites de Sona où prédomine le sodium.

Ces considérations sont tout à fait essentielles car elles impliquent que les eaux superficielles ruisselant (ou ayant ruisselé) sur les différents bassins versants ont des compositions chimiques également différenciées. Les sols correspondants devraient alors montrer des garnitures cationiques en rapport avec les conditions géologiques.

D'un point de vue tout à fait général, ces considérations impliquent également l'impérieuse nécessité de l'évaluation des phénomènes de dégradation des sols à grande échelle, en relation avec les facteurs environnementaux locaux.

CHAPITRE II

LES EAUX D'IRRIGATION

L'irrigation a pour ambition de sécuriser la fourniture des denrées alimentaires des populations des zones arides. Mal contrôlée, elle peut engendrer la dégradation des sols. L'importance de cette détérioration dépend de la qualité de l'eau et des propriétés des sols utilisés.

Le fleuve Niger fournit la totalité des ressources hydriques mobilisées pour l'irrigation et l'alimentation humaine dans la vallée. L'instabilité du régime hydrologique du fleuve, surtout en année sèche (Gallaire, 1986), a incité à la création d'un centre (Hydroniger) chargé du suivi de ses écoulements dans l'ensemble du bassin versant. Par contre, la qualité de ses eaux n'a fait l'objet que d'analyses ponctuelles lors de montages de projets d'aménagements hydro-agricoles. Les deux stations de recherche en hydraulique agricole de Lossa et de Tillakaïna se sont, jusque là, préoccupées de la mise au point des doses d'irrigation et, secondairement, de l'amélioration du transport l'eau.

Les chroniques chimiques, de durée appréciable, ont commencé très récemment (Gallaire, 1986 ; Barbiéro, 1994). Avec l'apparition de plages de dégradation des sols sur les périmètres, la qualité de l'eau du fleuve Niger, en tant que composante importante de gestion de cette eau, mérite une attention plus accrue. Aussi, dans le cadre de notre problématique, cette qualité est abordée à partir de relevés sur les périmètres de Tillakaïna et Kollo. A ces derniers est adjoint le suivi de l'eau à la station de pompage de Saga. Le périmètre de Saga est situé dans un quartier périphérique du même nom en aval de l'agglomération de Niamey.

La présentation des résultats d'enquête relative à l'eau sera précédée de la méthodologie de son étude.

II.1 - METHODES D'ANALYSE DES EAUX

Les eaux d'irrigation ont été prélevées chaque semaine sur les périmètres de Kollo et de Saga du 20 novembre 1995 au 2 juillet 1996, soit pendant 7 mois. En raison de la distance et des difficultés logistiques, l'échantillonnage n'a pas respecté systématiquement le pas de temps hebdomadaire dans le cas de Tillakaïna. Précisons aussi que Saga est un quartier de Niamey et son périmètre périurbain a fait l'objet d'étude dans le cadre du Projet de management de l'irrigation conduit par l'IIMI.

La température, la conductivité électrique et le pH sont mesurés sur le terrain avec des appareils portatifs.

Au laboratoire de pédologie de la Faculté d'Agronomie de Niamey, les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} sont déterminés par complexométrie à l'EDTA tandis que K^+ et Na^+ le sont par spectrophotométrie de flamme au

spectrophotomètre Kalemkap. Les anions SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^- sont analysés au spectrophotocolorimètre DR 2000 avec des réactifs Hach.

La qualité des données analytiques est contrôlée avec le logiciel «Soilchem». Pour la simulation de l'évaporation de l'eau d'irrigation, on a utilisé le logiciel «Aqua».

II.2 - RESULTATS

La qualité des eaux d'irrigation revêt deux aspects : les matières solides en suspension et la concentration des matières dissoutes. Dans la plupart des cas, c'est la qualité des éléments en solution qui ont donné lieu à des travaux depuis une quinzaine d'années de recherche pour caractériser la dégradation des périmètres irrigués en zone sahélienne.

D'après l'ORSTOM (1984), les concentrations mensuelles moyennes de matière en suspension sont 3 à 4 fois plus fortes en période humide qu'en saison sèche. Cela est dû à l'érosion des terres par les affluents lors des précipitations orageuses.

a) - Température, Conductivité électrique et pH

La température de l'eau augmente peu de novembre à la première moitié de janvier. Ensuite, elle amorce son ascension pour culminer à 35°C aux environs de 15 mai pour redescendre avec l'installation de la saison de pluies. La température de l'eau d'irrigation reflète les variations thermiques saisonnières du milieu ambiant.

La conductivité électrique (CE), à l'image de la température est relativement constante ($50 \mu\text{S cm}^{-1}$) pendant la période fraîche ; ensuite, elle augmente au fur et à mesure qu'on avance dans la saison chaude et sèche pour doubler vers fin mai.

La charge saline estimée (Schmidhalter *et al.*, 1989) varie de 32 à 64 mg L^{-1} . L'eau du fleuve Niger est très peu minéralisée même comparée à la norme FAO de $0,70 \text{ mS cm}^{-1}$ (Condom, 1996). La comparaison de l'évolution de la CE de l'eau d'irrigation des trois sites montre une augmentation nette à Tillakaina et Kollo par rapport à Saga. Tillakaina étant situé à 140 km en aval de Niamey, c'est le contraire qu'on devrait relever. Kollo est certes en aval de Niamey mais à 40 km seulement, et l'hypothèse d'une dégradation de l'eau sur une aussi faible distance est difficile à admettre. Cette élévation de la CE dans les deux sites correspondrait à la dégradation de l'eau d'irrigation lors du transport de la station de pompage aux parcelles irriguées. En effet, les eaux de ces périmètres ont été, tout le temps des observations, échantillonnées dans les mêmes arroseurs aboutissant aux parcelles à efflorescences salines.

Tableau II.1 : Variations de la composition chimique des eaux d'irrigation

Kollo	me L ⁻¹										
	CE μScm^{-1}	T °C	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
20-nov-95	55.20	28.0	6.20	0.30	0.80	0.04	0.09	0.06	0.00	0.67	0.50
27-nov	54.00	26.0	7.80	0.40	0.70	0.04	0.08	0.04	0.01	0.67	0.50
04-déc	50.00	26.0	7.85	0.30	0.30	0.04	0.10	0.02	0.00	0.22	0.50
10-déc	53.00	25.0	7.20	0.20	0.20	0.13	0.09	0.06	0.00	0.06	0.50
18-déc	60.00	25.0	7.25	0.40	0.80	0.03	0.11	0.00	0.01	0.50	0.83
25-déc	55.00	23.5	6.95	0.50	0.20	0.04	0.11	0.10	0.00	0.05	0.70
1 janv 96	55.00	24.0	6.60	0.20	0.70	0.04	0.12	0.20	0.00	0.36	0.50
08-janv	53.00	24.0	6.86	0.20	0.40	0.04	0.11	0.10	0.00	0.35	0.40
15-janv	54.50	24.0	7.76	0.20	0.60	0.04	0.12	0.02	0.02	0.42	0.50
22-janv	56.00	28.7	7.29	0.30	0.20	0.03	0.12	0.02	0.00	0.13	0.50
29-janv	57.00	27.0	7.34	0.30	0.30	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.70
05-févr	58.00	27.0	7.25	0.60	0.10	0.02	0.09	0.04	0.02	0.05	0.70
12-févr	67.00	25.0	7.80	0.50	0.40	0.04	0.11	0.00	0.00	0.35	0.70
19-févr	91.00	26.0	7.28	0.70	0.80	0.09	0.17	0.02	0.01	0.23	1.50
26-févr	117.20	30.0	6.25	0.40	0.60	0.03	0.11	0.10	0.00	0.00	1.20
04-mars	246.00	28.0	8.32	0.70	0.60	0.02	0.62	0.31	0.01	0.30	1.32
Tillakalna											
27-nov	57.0	23.0	7.30	0.70	0.10	0.03	0.11	0.02	0.00	0.12	0.80
04-déc	60.0	27.0	8.25	0.20	0.30	0.03	0.10	0.08	0.00	0.13	0.50
10-déc	63.0	24.0	7.57	0.00	0.60	0.05	0.15	0.02	0.00	0.28	0.50
18-déc	63.0	28.0	7.85	0.20	0.40	0.05	0.15	0.06	0.00	0.04	0.70
25-déc	71.0	28.0	7.25	0.20	0.50	0.06	0.15	0.14	0.00	0.17	0.60
1 janv 96	72.0	30.0	7.92	0.20	0.50	0.06	0.17	0.16	0.00	0.12	0.65
08-janv	106.0	30.0	8.39	0.20	0.30	0.07	0.18	0.15	0.00	0.00	0.75
Saga											
20-nov-95	54.6	25.0	6.60	0.30	0.30	0.03	0.10	0.04	0.00	0.00	0.70
27-nov	56.0	22.0	7.54	0.20	0.40	0.04	0.10	0.02	0.00	0.22	0.50
04-déc	49.0	23.0	7.37	0.20	0.40	0.03	0.09	0.02	0.01	0.27	0.40
10-déc	51.4	24.0	7.02	0.20	0.30	0.03	0.10	0.02	0.00	0.11	0.50
18-déc	67.8	23.0	7.17	0.50	0.60	0.03	0.10	0.02	0.00	0.55	0.66
25-déc	52.0	22.5	6.30	0.20	0.70	0.04	0.12	0.04	0.01	0.31	0.70
1 janv 96	53.0	21.0	6.35	0.10	0.70	0.04	0.12	0.04	0.00	0.32	0.60
08-janv	55.0	21.0	6.60	0.20	0.60	0.04	0.13	0.00	0.00	0.47	0.50
15-janv	54.7	22.0	6.54	0.20	0.40	0.03	0.12	0.00	0.00	0.25	0.50
22-janv	56.0	28.5	7.30	0.40	0.30	0.03	0.13	0.02	0.00	0.34	0.50
29-janv	56.0	25.0	7.50	0.40	0.30	0.01	0.07	0.02	0.01	0.05	0.70
05-févr	57.0	26.0	7.45	0.40	0.60	0.02	0.09	0.02	0.02	0.37	0.70
12-févr	56.0	25.0	7.12	0.20	0.60	0.03	0.09	0.00	0.01	0.31	0.60
19-févr	59.0	23.0	6.98	0.40	0.30	0.04	0.11	0.02	0.01	0.22	0.60
26-févr	57.6	25.0	6.98	0.20	0.40	0.03	0.11	0.02	0.00	0.12	0.60
04-mars	61.3	26.0	7.70	0.10	0.50	0.04	0.11	0.04	0.01	0.00	0.70
11-mars	62.0	26.0	7.87	0.10	0.40	0.03	0.10	0.10	0.00	0.00	0.70
18-mars	77.0	26.0	7.12	0.10	0.50	0.06	0.18	0.08	0.01	0.00	0.80
25-mars	64.0	27.0	7.39	0.10	0.80	0.05	0.15	0.04	0.01	0.35	0.70
01-avr	64.3	29.0	7.85	0.00	1.20	0.05	0.15	0.02	0.00	0.68	0.70
15-avr	66.0	31.0	7.82	0.30	0.50	0.06	0.17	0.06	0.00	0.17	0.80
23-avr	109.0	32.0	7.37	0.30	0.40	0.07	0.20	0.08	0.00	0.19	0.70
07-mai	84.0	32.0	8.00	0.20	0.40	0.06	0.17	0.06	0.00	0.00	1.10
13-mai	94.0	35.0	8.60	0.20	0.40	0.06	0.18	0.02	0.00	0.00	1.10
21-mai	80.0	34.0	9.21	0.20	0.30	0.06	0.17	0.04	0.00	0.00	0.90
27-mai	85.0	32.0	9.37	0.20	0.30	0.06	0.20	0.12	0.00	0.00	1.10
20-juin	90.0	32.0	8.55	0.20	0.40	0.05	0.21	0.10	0.00	0.00	1.00
02-juil	95.0	33.0	8.30	0.30	0.40	0.05	0.20	0.12	0.00	0.03	0.80

Le pH, proche de la neutralité dans l'ensemble, s'acidifie légèrement en périodes de hautes eaux (décembre-janvier) et augmente sensiblement pour devenir franchement basique en fin de saison sèche et chaude.

b) - Composition chimique

Les cations bivalents, calcium et magnésium, dominent largement les monovalents. Le sodium en solution représente 12 à 16 % de la partie cationique.

Tout au long du relevé, le SAR de l'eau d'irrigation est déduit des concentrations cationiques. Il demeure inférieur à l'unité. Le potassium est en très faible concentration. Entre mars et mai, les variations des concentrations en calcium et magnésium indiquent un comportement opposé entre les deux éléments et de part et d'autre de cet intervalle de temps, ils affichent une allure semblable.

A Kollo et Saga, les eaux sont en équilibre avec l'atmosphère, leur faciès présente une certaine hétérogénéité (fig. II.1), mais dans l'ensemble, elles apparaissent bicarbonatées calciques et/ou magnésiennes.

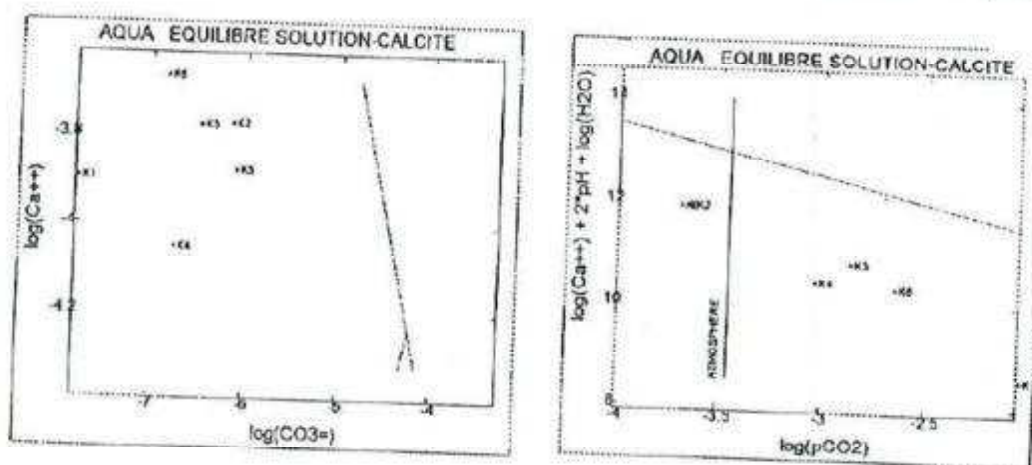


Fig. II.1. Tests de saturation des eaux d'irrigation de Kollo vis à vis de la calcite

L'analyse par ACP et AFC conduit aux mêmes résultats dans les deux sites. Elle montre que ce sont les axes III et IV qui sont les plus importants.

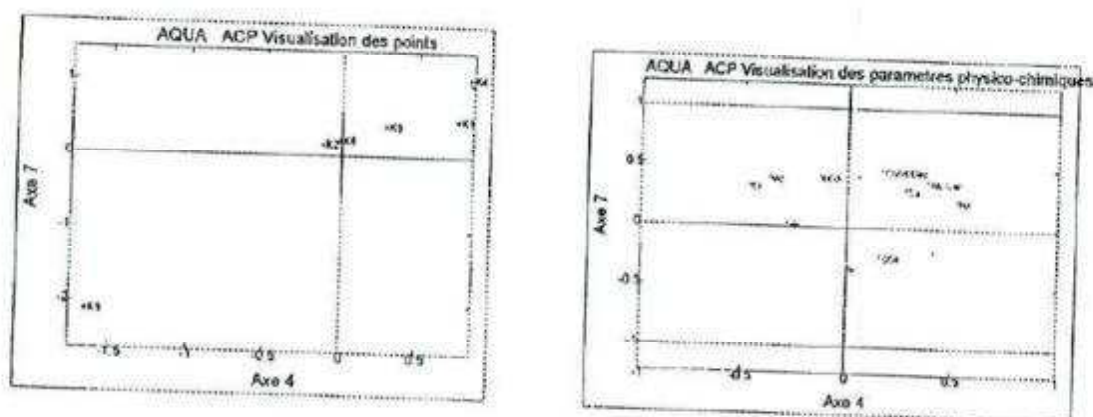


Fig. II.2 - ACP et AFC sur les eaux d'irrigation de Kollo

Il apparaît deux groupes de paramètres et d'éléments chimiques :

- le premier groupe est constitué de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , l'alcalinité, et la CE. Il s'agit d'éléments qui se concentrent naturellement dans les eaux ;
- le second regroupe le K^+ et SO_4^{2-} . Ces deux éléments sont qualifiés d'*anthropiques* car leur présence dans les eaux peut être renforcée par l'activité humaine (apport d'engrais par exemple).

On note que Na^+ et l'alcalinité se suivent, ce qui est conforme aux résultats d'autres chercheurs (Doubi, 1976 ; Bourrié, 1974 ; Barbiéro, 1994 ; Marlet, 1995).

A Tillakaina, la pCO_2 de l'eau est faible et indique un milieu peu confiné. Ceci refléterait la composition d'une eau en contact avec des roches cristallines ou avec des sédiments renfermant des aluminosilicates (feldspaths, argiles).

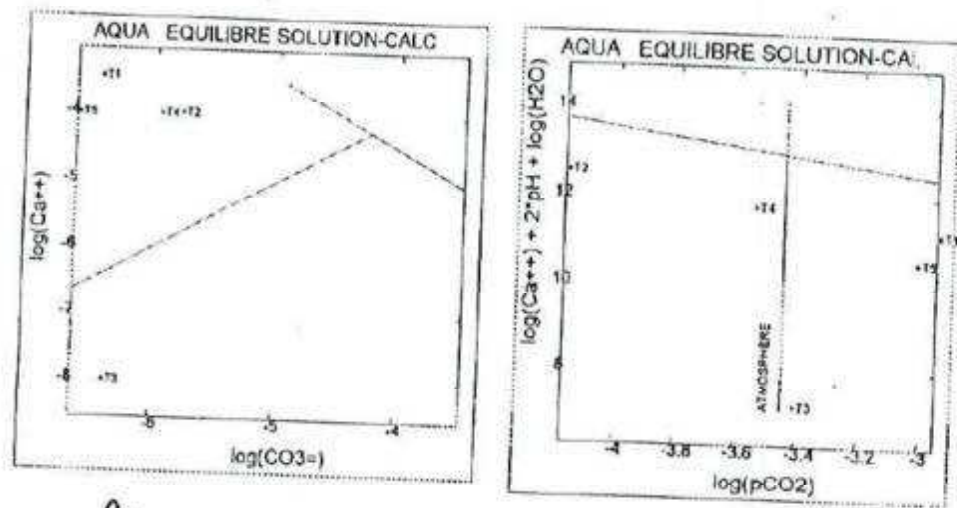


Fig. II.2 - Equilibres des eaux d'irrigation de Tillakaina vis à vis de la calcite

Les eaux d'irrigation, étudiées par ACP et AFC, font apparaître deux axes forts (fig. II.2). Le premier axe (52 %) est formé par le couple $\text{CE}-\text{Na}^+$ et le second axe (23 %) est formé par Mg^{2+} et Cl^- . Le regroupement de Ca^{2+} et de l'alcalinité signifie que ces deux éléments proviendraient de la dissolution de la calcite.

c - Simulation de l'évaporation

Les eaux d'irrigation présentant dans leur ensemble un même type de faciès, la simulation de l'évaporation a été réalisée sur Tillakaina. L'essentiel de la calcite se formerait quand le facteur de concentration varie de 2 à 10. Il y a une légère sodisation du complexe adsorbant, une augmentation du Mg^{2+} et du pH.

Les eaux d'irrigation de Saga et de Kollo sont géochimiquement semblables de celles de Tillakaina ; elles en sont différentes par la pCO_2 et la CE. Néanmoins, on constate que, dans tous les tests géochimiques, le Na^+ intervient ce qui va lui conférer une importance dans les échanges entre les eaux d'irrigation et les sols.

Quant au cas particulier de Tillakaina, il est possible que la diminution du calcium au profit du magnésium soit le résultat de sa précipitation sous forme de calcite. En effet, l'anion bicarbonate, déjà largement prédominant dans le compartiment anionique, voit sa concentration augmentée parallèlement à la montée de la température.

Le faciès bicarbonaté calcique et/ou magnésien des eaux du fleuve Niger (Guéro, 1987 ; Barbiéro, 1994) ne subit pratiquement aucun changement en cours d'année. Par contre, les concentrations des éléments chimiques majeurs montrent des variations sensibles. Plus spécialement, la diminution du calcium en faveur du

magnésium serait due à sa précipitation sous forme de carbonate de calcium comme dans le cas des eaux du bras mort qui irriguait le périmètre de Sona (Barbiéro, 1994).

Selon les normes américaines (Richards, 1954), l'eau du fleuve Niger est d'excellente qualité pour l'irrigation. Cependant, ces normes ont été jugées statiques (Cheverry, 1972 ; Vallès *et al.*, 1989). Lorsqu'on lui applique le concept, plus dynamique, d'alcalinité résiduelle calcite, elle devient incrustante par précipitation du calcium comme l'ont démontré d'autres auteurs en étudiant des eaux de même faciès en régime évaporatoire (Cheverry, 1972 ; Droubi, 1976 ; Rieu, 1980 ; Vallès *et al.*, 1989, 1990). Un tel comportement de Ca^{2+} entraîne une augmentation relative des ions monovalents, le sodium particulièrement.

Au total, quoique très peu minéralisées, les eaux du fleuve Niger présentent la caractéristique d'être incrustantes par précipitation du calcium (calcite) au cours de leur évaporation ; Un tel comportement entraîne *ipso facto* une augmentation relative des autres ions, particulièrement du sodium. Associé au caractère bicarbonaté largement mis en cause dans l'alcalinisation des sols par l'Office du Niger au Mali (N'Diaye, 1987 ; Vallès *et al.*, 1989 ; Bertrand *et al.*, 1993), le sodium des eaux d'irrigation pourrait donc contribuer à la dégradation des sols irrigués du Moyen Niger.

CHAPITRE III

LES SOLS DES TROIS PERIMETRES

III.1 - METHODES D'ETUDE DES SOLS

L'étude a été menée à partir de toposéquences. Les observations ont été faites sur des fosses pédologiques complétées au besoin par des sondages à la tarière à main. Le manuel de description élaboré par Maignien (1969) a été largement utilisé. Après la caractérisation morphologique, les échantillons de sol ont été prélevés et conditionnés dans des sachets en plastique.

Les analyses de laboratoire se sont déroulées au laboratoire du GERDAT à Montpellier (France) et ont consisté :

- en des déterminations granulométriques par la méthode à la pipette de Robinson pour l'argile, les limons fin et grossier. Les sables fin et grossier sont obtenus par lavages successifs et tamisage (AFNOR, 1983) ;
- en l'étude du complexe d'échange (cations échangeables, capacité totale d'échange) selon la méthode décrite par Fallavier *et al.* (1985) ;
- en la mesure du pH sur une suspension de sol selon le rapport sol/ eau = 1/ 2,5.

III.2 - RESULTATS

III.2.1 - Etude morphologique des sols

a - Tillakaina

De l'organisation morphologique des profils se déduisent des traits pédologiques spécifiques.

La structure polyédrique grossière à moyenne est la plus fréquente dans les horizons de surface. En profondeur, elle devient surtout prismatique à fusiforme ou massive mais rarement polyédrique grossière. La structure est dégradée avec la profondeur.

Les nodules calcaires présentent différents faciès (sphérique et dur, creux rempli d'argile et petites concrétions blanches). Ils sont constamment localisés à l'intérieur des profils et rarement en surface. Aux nodules s'ajoutent des amas calcaires friables et de couleur un peu plus blanche. Le calcaire se trouve aussi sous forme de pseudo-mycellium.

L'hydromorphie se manifeste par des concrétions ferro-manganiques et taches d'oxydoréduction. Elles s'amplifient avec la profondeur. Les taches d'hydromorphie, deviennent de plus en plus marquées avec la profondeur, et parallèlement à la dégradation de la structure. On note aussi qu'elles sont plus intenses dans les profils TE4 et TE5. Dans le profil TO3, la réduction provoque l'apparition de taches noires.

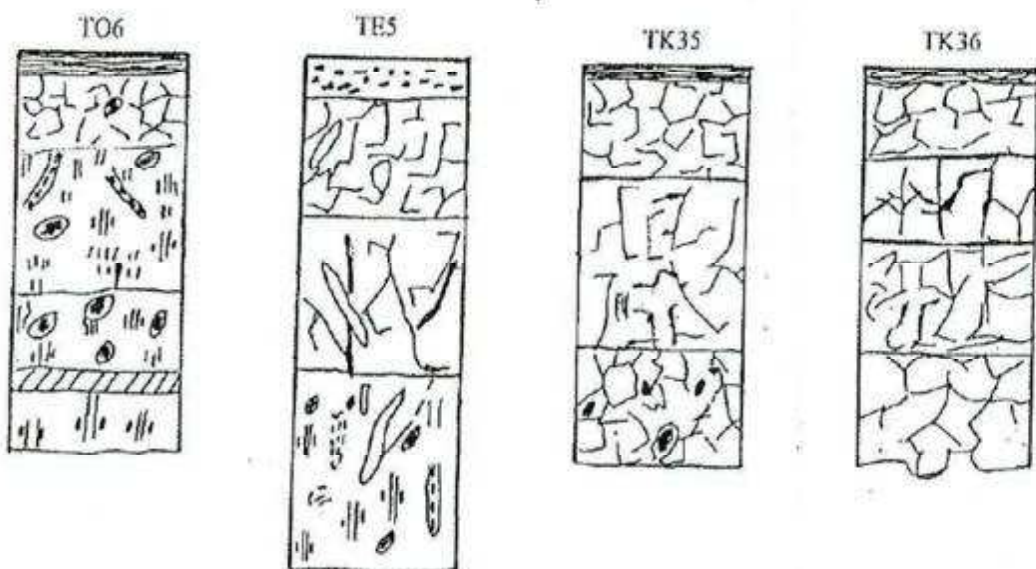
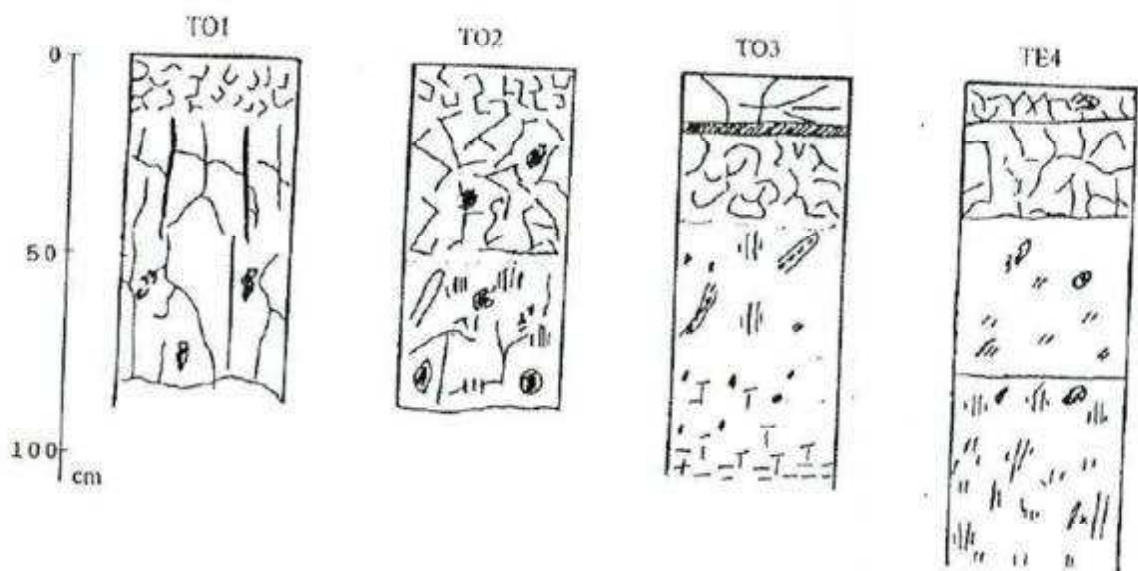


Fig. III.1 - Morphologie des profils pédologiques de la terrasse de Tillakaina

Les témoins de l'activité biologique sont les galeries et nids de termites. Les galeries sont, dans la plupart des cas, remplies de matériaux plus ocres. Ces matériaux de remplissage proviendraient des horizons de

surface. L'activité des termites est importante en raison de la permanence de l'humidité (irrigation en saison sèche relayée par la saison de pluies) et des résidus organiques divers. La matière organique trouvée à la base du profil TO6 est indicatrice d'un milieu marécageux.

Les enduits argileux sont localisés dans des emprunts caillouteux et seraient dus à la mise en place des alluvions ;

L'altérite du granodiorite est rencontrée à la base des profils TE4 et TO3. Dans ce dernier profil, les altérites baignent dans une nappe perchée, qui serait due à l'irrigation exagérée comme semblait le penser l'exploitant local (prospection au mois de juillet 1993). De plus la situation géologique et géomorphologique du profil l'explique. En effet, le profil TO3 est situé dans une cuvette armée de hauts fonds rocheux .

Des efflorescences salines sont relevées dans les environs immédiats du profil TO3.

Une semelle de labour a été notée à l'examen des profils TE4 et TO3.

De l'étude morphologique des sols de la terrasse de Tillakaina, on relève la disparition de la structure polyédrique des horizons superficiels avec la profondeur et l'apparition des signes d'hydromorphie qui s'intensifient.

Le carbonate de calcium aurait connu une dynamique ancienne traduite par les nodules et une autre plutôt actuelle sous forme de pseudo-mycellium (Guero, 1987).

b) - Sona

Sur l'ensemble du transect, la structure polyédrique grossière à moyenne est bien exprimée en partie supérieure des profils. Elle devient moyenne à fine dans les horizons intermédiaires. Cette structure polyédrique descend plus profondément dans les profils STA4T et SA7T. Le reste des horizons profonds affiche une structure polyédrique angulaire (S1610) qui devient massive à polyédrique subangulaire (SB4G et SC3T) à partir de 40 cm ou massive à prismatique (SB4T) à partir de 32 cm.

La présence simultanée de taches grises et ocres donnant un aspect bariolé. Ces taches d'hydromorphie remontent vers la surface lorsqu'on se déplace vers le fleuve. On note aussi que l'apparition des signes d'hydromorphie coïncide parfaitement avec la structure massive.

Les nodules calcaires se retrouvent toujours en profondeur. Ils sont plus nombreux et distribués sur une plus grande épaisseur dans les profils SA4T et SA7T. Les nodules varient en taille et en forme. Ce trait pédologique se raréfie puis disparaît vers le fleuve.

Comme à Tillakaina, les sols sont affectés par des nodules calcaires et de l'hydromorphie. On note l'absence généralisée de nappe phréatique.

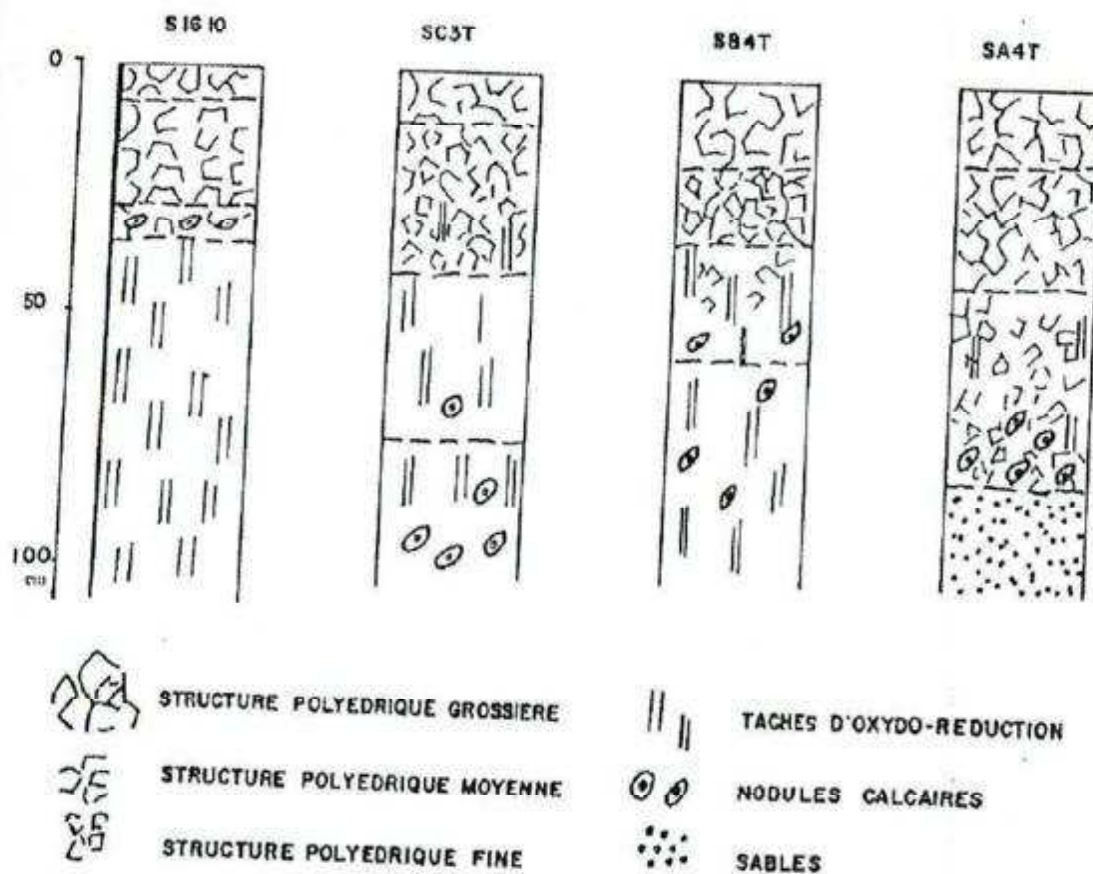


Fig. III.2 : Morphologie des profils pédologiques de la terrasse T3 de Sona.

c) - Kollo

L'étude morphologique montre que les horizons de surface sont secs sur les 30 premiers centimètres. Ensuite les profils deviennent frais entre 30 et 50 cm pour passer à très humides ou saturés entre 70 et 100cm. A la base se trouve la nappe phréatique. La nappe alluviale peut être masquée par un lit gravillonnaire consolidé par les oxydes de fer difficile à traverser à la tarière.

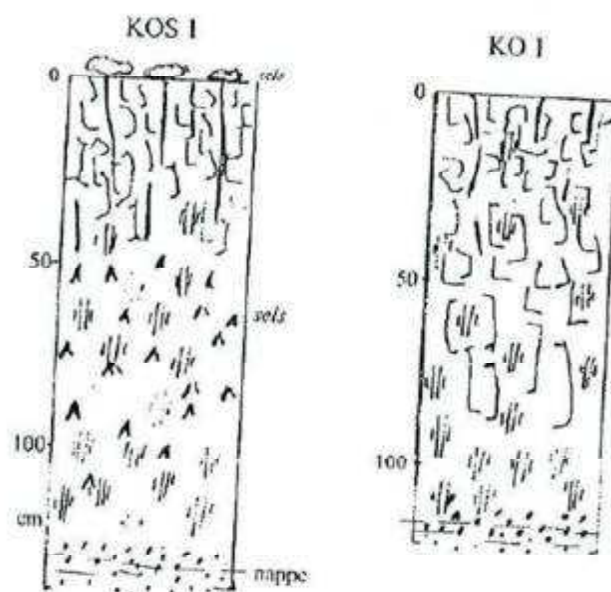


Fig. III.3 : Morphologie des profils pédologiques de la terrasse T4 de Kollo

Dans le profil, la précipitation de sels se manifeste, macroscopiquement, sous forme de taches blanches. A la loupe, ils apparaissent sous forme d'aiguilles disposées en étoile. On note aussi que ces précipitations sont plus présentes dans les horizons oxydés rouge vif et secondairement en association avec les taches jaunes du fer. Les sels sont mis en place principalement dans l'horizon argileux qui est d'autant plus épais qu'on s'approche du fleuve. Les cristallisations ne concernent pas le gley de profondeur.

Il apparaît un gradient d'humidité qui croît de la surface vers la profondeur. Ce gradient privilégierait la remontée capillaire. Cette dernière serait à son tour responsable des dépôts de sels en surface comme dans le corps du profil. La nappe, à la base des sols, contrôlerait la distribution des formes du fer. Cette nappe était faiblement en charge lors de l'ouverture des profils. Les fentes de retrait s'expriment nettement en surface plus sèche.

Il se dégage de l'étude morphologique des sites les points suivants :

- une absence de traits d'illuviation dans les sols des terrasses T3 de Tillakaina et Sona ;
- un changement net de structure entre la surface et la profondeur ;
- la présence de signes d'hydromorphie sur l'ensemble des profils étudiés. Cependant, la nappe est exceptionnelle et très localisée en T3, constante en T4 ;
- la présence d'efflorescences salines se trouvant à la surface des sols ayant une nappe à faible profondeur.

III.1.2 - Analyse de la texture

a) - Distribution des horizons dans le triangle de texture

La figure III.4 montre la distribution des horizons de sols des trois périmètres dans le triangle de texture.

Il apparaît clairement une distribution entre les pôles sable-argile avec une prédominance de texture argileuse (Tableau III.1), suivie des textures sablo-argileuse à argilo-sableuse. Cette répartition entre les pôles argile et sable rejoint les résultats antérieurs (SOGETHA, 1974 ; Féau, 1976 ; Guéro, 1987 ; Valet, 1995).

Tableau III.1 : Proportions (%) des horizons dans les différentes classes texturales.

	Tillakaina	Sona	Kollo
très argileux	38,60	44,12	100
argileux	17,64	19,10	
argilo-sableux	0,00	17,64	
sablo-argileux	0,00	17,64	
Sableux	5,76	3,00	

Les horizons de surface sont principalement sablo-argileux à argilo-sableux et secondairement argileux. La mise en parallèle de la description morphologique et des classes texturales montre que l'encroûtement superficiel est nettement perceptible dans les textures sablo-argileuses à argilo-sableuses où prédominent les sables fins.

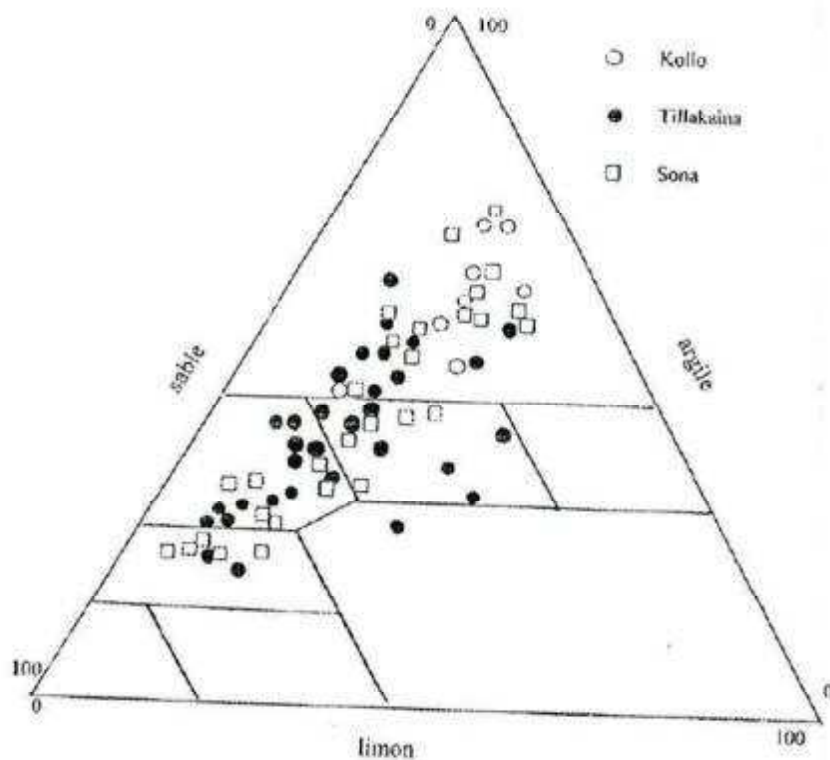


Fig. III.4 - Distribution dans le triangle de texture des horizons des sols des trois périmètres

Bien que la majorité des horizons aient une teneur en argile supérieure à 40 %, les caractères verticaux (fentes de retrait) s'expriment modestement dans les sols des terrasses. En effet, lors de la description morphologique, seuls les profils TO1 de Tillakaina, SA4T et SA7T de Sona et KOS1 de Kollo ont présenté des fentes de retrait sur une profondeur de 50 cm. Les rares faces de glissement ont été relevées en SA7T et KOS1.

Les teneurs en argile augmentent de la surface vers la profondeur dans les sols de Tillakaina et de Sona. Elles ne montrent aucun décrochement symbolisant un « ventre d'argile » dû au lessivage même dans les profils SC3T et TO6 où quelques concentrations argileuses, plutôt d'origine sédimentaire, ont été relevées. La carte d'isovaleurs de l'argile totale sur le transect de Sona (fig. III.5) confirme la structure sédimentaire des matériaux pédologiques. Une telle structure est à la base de la variabilité élevée des variables texturales (Valet, 1995).

Les limons sont en faible proportion dans l'ensemble des profils étudiés dans les différents périmètres. La fraction sableuse totale, essentiellement quartzreuse, est dominée par les sables fins dans tous les profils.

Les analyses granulométriques viennent confirmer l'examen morphologique. Aussi les concentrations argileuses rencontrées apparaissent plus rattachées à la sédimentation qu'au phénomène de lessivage.

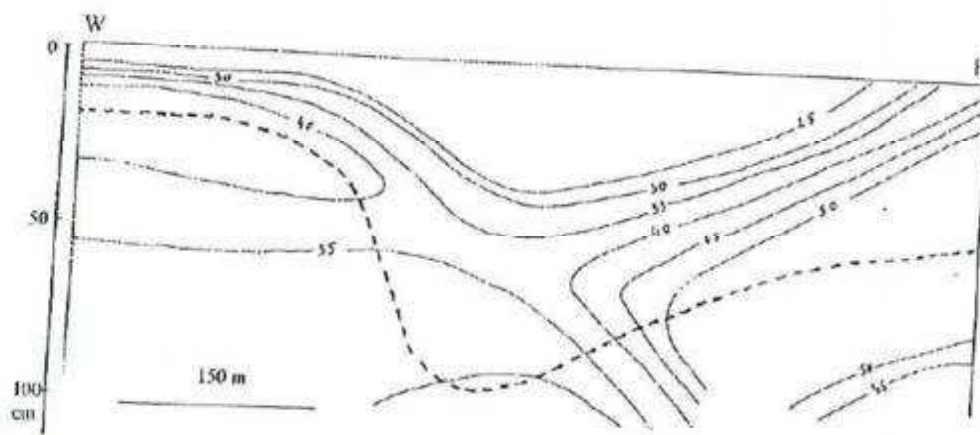


Fig III.5 : Carte d'isoteneurs de l'argile totale à Sona (les tirés indiquent la profondeur maximale d'infiltration des eaux)

b) - Observations microscopiques

Les plaques minces ne montrent pas d'argilanes. On pourrait toutefois considérer que l'illuviation n'est pas visible en raison de la présence d'argile gonflante (Nettleton *et al.*, 1969 ; Nettleton et Peterson, 1983). Cependant, en l'absence de traits vertiques forts, il semble logique d'exclure des transferts importants d'argile. En revanche, les concentrations argileuses identifiées correspondent à des figures sédimentaires.

Au total, les études morphologiques, texturales et microscopiques concourent à démontrer que les variations des constituants granulométriques, particulièrement l'argile, à l'intérieur d'un profil comme d'un profil à un autre, sont à relier plus à l'alluvionnement qu'à d'éventuels processus pédogénétiques.

III.2.3 - Le complexe d'échange

Les caractéristiques du complexe d'échange des sols des trois sites étudiés sont consignées dans les tableaux III.2, III.3 et III.4.

a) - pH

A *Tillakaina* et à *Sona*, le pH augmente généralement avec la profondeur dans l'ensemble des profils pédologiques de la terrasse T3 de neutre à légèrement alcalin en surface, il devient franchement alcalin en profondeur mais ne dépasse guère la valeur de 9,50.

Les valeurs de pH obtenues sont similaires à celles notées par Valet (1979) mais plus élevées que celles de l'étude pédologique provinciale de Tillabéry (SOGETIA, 1971).

A *Kollo*, les sols montrent un pH franchement acide.

Tableau III.2 - Complexe d'échange des sols de Tillakaina (me/100 g)

profil	prof. cm	Ca	Mg	K	Na	CEC	V %	pH eau
TO1	0-15	22.34	7.8	0.58	0.27	32.57	95.16	7.7
	15-43	21.65	8.73	0.11	1.85	35.57	90.94	8.5
	43-80	16.35	12.05	0.08	6.98	38.95	91.06	8.75
TO2	0-12	13.57	6.21	0.12	2.26	24.3	91.22	8.55
		10.89	5.94	0.07	4.22	23.98	88.07	8.85
	45-90	13.88	9.05	0.09	6.38	32.13	91.49	8.95
TO3	0-12	11.02	4.01	0.15	0.5	17.95	87.3	8.5
		14.49	4.19	0	0.46	21.05	90.97	7.85
	38-60	16.64	4.51	0.06	0.47	23.52	92.17	7.95
	60-70	15.73	4.33	0.05	0.49	23.78	86.64	8.1
	70-100	15.18	4.36	0	0.69	23.08	87.67	8.15
TO6	0-4	11.94	4.82	0.87	0.14	17.51		8.13
		12.77	7.51	0.17	3.27	23.58		9.27
	20-60	8.91	6.83	0.12	5.85	22.25	97.62	9.52
	60-80	8.43	13.1	0.05	11.71	34.43	96.67	8.96
	80-85	7.83	15.64	0.02	13.07	38.12	95.9	9.39
	>80	5.63	12.35	0.02	9.2	28.63	95	9.54
TE4	0-10	14.39	5.68	0.46	0.25	22.18	93.66	8.5
		10.3	8.3	0.08	3.48	24.27	91.3	8.9
	33-55	8.83	9.16	0.11	5.65	27.16	87.44	8.9
	55-73	8.26	9.17	0.07	6.87	27.56	88.44	8.8
	73-85	6.48	7.53	0.07	6.77	25.12	83.04	9.1
TE5	0-10	13.65	6.09	0.85	0.04	21	98.24	8.08
		15.19	5.88	0.04	0.08	21.45	98.78	8.54
	40-80	14.52	3.15	0.05	0.09	17.3		8.69
	>80	11.95	1.6	0.01	0.06	13.29		8.75
TK 35	0-5	13.87	9.55	0.54	0.14	26.34	91.47	7.45
		12.12	7.38	0.11	1.93	23.91	90.1	8.85
	28-70	8.28	8.22	0.08	5.43	25.27	87.09	9
	70-85	8.45	8.75	0.1	6.22	26.66	88.18	9.21
TK 36	0-2	14.41	11.38	0.8	0.09	26.46	93.73	7.1
		12.16	9.41	0.1	0.1	24.45	89.01	7.15
	23-42	14.47	9.24	0.16	0.24	25.35	95.12	7.15
	42-70	15.53	9.27	0.08	0.16	27.11	92.38	7.05
	70-90	15.98	8.81	0.09	0.22	27.71	90.59	7.6

b) - Capacité totale d'échange

La capacité d'échange est habituellement induite par la matière organique et l'argile. les valeurs de la CEC des horizons étudiés sont réparties dans les trois classes proposées par Ruellan et Deletang (1967) dans leur étude sur la capacité totale d'échange des sols.

Tableau III.3 - Complexe d'échange des sols de Sona (me/100 g)

profil	prof. cm	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K+	Na+	CEC	V %	pH eau
SA4T	0-15	14,5	2,46	0,25	3	20,43	98,83	8,35
	15-40	18,4	3,37	0,09	9,2	33,45	92,8	8,7
	40-80	16,7	3,6	0,09	11,96	33,6	96,16	8,9
	>80	9,13	2,07	0	7,67	19,18	98,38	8,75
SA7T	0-20	19,5	3,91	0,62	3,66	28,91	95,61	7,95
	20-60	19,3	4,54	0,1	7,43	33,15	94,54	8,6
	60-70	19,9	5,28	0,08	7,78	35,2	93,92	8,65
	70-90	20,8	5,52	0,06	7,86	36,17	94,55	8,85
SB4T	0-17	10	2,65	0,16	0,8	13,99	97,5	7,3
	17-32	9,75	2,59	0,05	3,15	14,73	105,5	8,55
	32-56	9,59	2,57	0,05	7,93	20,43	98,58	8,5
	56-100	10,4	2,46	0,06	13,29	27,73	94,6	8,35
SB4G	0-25	13,8	2,82	0,29	2,85	19,94	98,9	8,05
	25-40	14	2,55	0,1	7,79	24,77	98,75	8,3
	40-100	12,2	1,83	0,06	13,13	28,68	94,94	8,25
SC3T	0-10	5,86	2,54	0,13	0,56	8,27	109,92	7,05
	10-40	5,43	2,66	0	2,57	10,2	104,51	8,45
	40-73	6,8	2,84	0	7,59	16,91	101,89	8,75
	73-85	9,3	2,67	0	11,03	17,96	128,06	8,45
	85-100	7,25	2,06	0,01	8,36	15,24	116,01	8,45
SC3G	0-13	5,07	2,74	0,1	0,84	7,98	109,65	7,1
	13-42	7,6	3,03	0	3,23	13,55	102,3	8,5
	42-73	11,5	3,4	0	6,64	21,36	100,75	8,45
	73-100	11,7	2,9	0,02	6,54	20,74	102,2	8,45
	>100	7,17	1,74	0	3,77	12,71	99,8	8,45
S1610	0-6	4,92	2,34	0,31	1,34	8,16	109,2	7,1
	6-28	11,8	2,66	0,28	6,95	22,05	98,5	8,85
	28-35	10,6	1,5	0,21	11,93	24,06	100,7	9,2
	35-110	6,55	0,97	0,13	11,49	19,15	100	9,2
SS	0-5	4,03	3,25	0,28	0,24	9,44	82,6	7,05
	5-15	11,6	4,86	0,02	1,63	20,7	87,45	8,3
	15-55	14,9	5,11	0,04	2,96	25,68	86,7	8,15
	55-100	15,2	6,46	0,05	4,47	29,09	90,03	8,09
	>100	16	6,94	0,05	5,41	31,35	90,46	8,52

Tableau III.4 - Complexe d'échange des sols de Kollo (me/100 g)

Profil	prof. cm	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CEC	V %	pH
KOS1	0-20	4,27	10,46	0,14	0,5	16,5	93,6	4,42
	20-50	14,36	5,3	0,26	0,26	15,7	127,45	4,26
	50-70	9,7	3,38	0,39	0,14	12,7	107,34	4,33
	70-100	10,31	5,01	0,47	0,13	16,63	95,73	4,4
KO1	0-2	7,41	5,76	0,57	0,11	16,27	85,12	6,19
	*2-20	6,88	5,05	0,62	0,09	16,29	77,6	4,78
	20-50	6,45	5	0,46	0,19	16,79	71,9	4,75
	50-100	5,5	4,73	0,2	0,3	17	63,1	5

L'essentiel des horizons des sols de Tillakaina et de Sona présentent une forte capacité d'échange (tableaux III.2 et III.3) contrairement à Kollo qui affiche uniquement des valeurs moyennes (tableau III.4). En valeur absolue, la capacité totale d'échange cationique à Tillakaina est nettement plus élevée que celle de Sona. Cette différence de valeurs de CEC relèverait d'une quantité de smectite plus importante à Tillakaina.

Tableau III.5 : Proportions (%) des horizons dans trois classes de CEC (me /100 g sol)

	Tillakaina	Sona	Kollo
> 20	88,20	76,40	0
10 - 20	11,80	11,76	100
< 10	0	11,76	0

Les variations de la CEC observées refléteraient les proportions des minéraux phylliteux dans les sols étudiés. La fraction argileuse intervient à la fois par son abondance et sa nature minéralogique (Caillère *et al.*, 1962 ; Duchaufour, 1988).

Relativement aux valeurs de la CEC, les sites sont hiérarchisés comme suit :

Tillakaina>Sona>Kollo

A Tillakaina et à Sona, il existe une corrélation simple et significative entre la capacité totale d'échange et le taux d'argile (figure III.6).

$$CEC = 0.376A + 10.43 (R^2 = 0.53) \text{ à Tillakaina}$$

$$CEC = 0.456A + 1.82 (R^2 = 0.82) \text{ à Sona}$$

$$CEC = 0.113A + 9.20 (R^2 = 0.52) \text{ à Kollo}$$

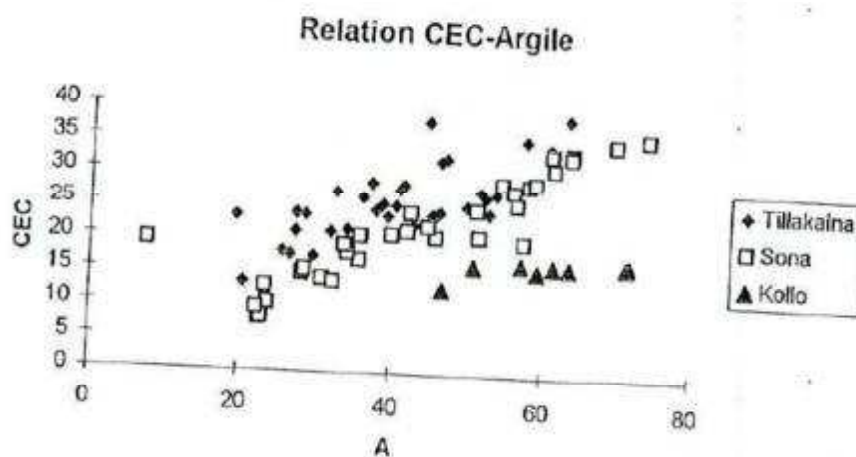


Fig. III.5 : Relation entre le taux d'argile et la capacité d'échange cationique (Tillakaina, Sona et Kollo)

Les droites de régression des sites de Tillakaina et de Sona sont quasi-parallèles, suggérant une nature semblable des matériaux argileux. Cependant cette relation est moins bonne dans le cas de Tillakaina

A Kollo, la CEC augmente peu avec l'augmentation d'argile, en relation avec le type minéralogique dominant qui est ici la kaolinite. Comme à Tillakaina, la corrélation est moyenne.

c) - Taux de saturation -Cations échangeables

Les sols de la moyenne terrasse de Tillakaina et Sona sont saturés en cations (80 à 100 %). La sursaturation dans les profils SC3T et SC3G serait indicatrice de la dissolution de sels notamment le carbonate de calcium sous forme de pseudomycellium.

Dans le site de Kollo, le profil extérieur au périmètre montre un taux de saturation de 85 % en surface à 63 % dans l'horizon le plus profond observé. Le sol situé à l'intérieur du périmètre est sursaturé en cations échangeables ; ce qui traduit la dissolution des sels par l'extractant.

Les hiérarchisations des teneurs de cations échangeables sont les suivantes :

A Tillakaina :

en surface $Ca > Mg > Na > K$

dans les horizons profonds $Mg > Na$ ou $Mg + Na > Ca > K$

A Sona :

pour environ 70 % des profils $Ca > Na > Mg > K$.

les horizons profonds présentent parfois la séquence $Na > Ca > Mg > K$.

pour l'ensemble des profils $Ca > Mg > K > Na$.

Si la hiérarchisation habituellement admise (Ruellan et Deletang, 1967) est respectée dans les sols de basse terrasse (T4) de Kollo, il n'en est pas de même des sols de terrasse moyenne (T3) de Tillakaina et de Sona. En effet, à Tillakaina, ce sont les cations magnésium et sodium qui sont prépondérants, à Sona, le sodium l'emporte sur les autres cations échangeables, indiquant ainsi des conditions peu lixiviantes ou de confinement (Fig. III.6) ; de plus, le calcium et le sodium ont une variation opposée.

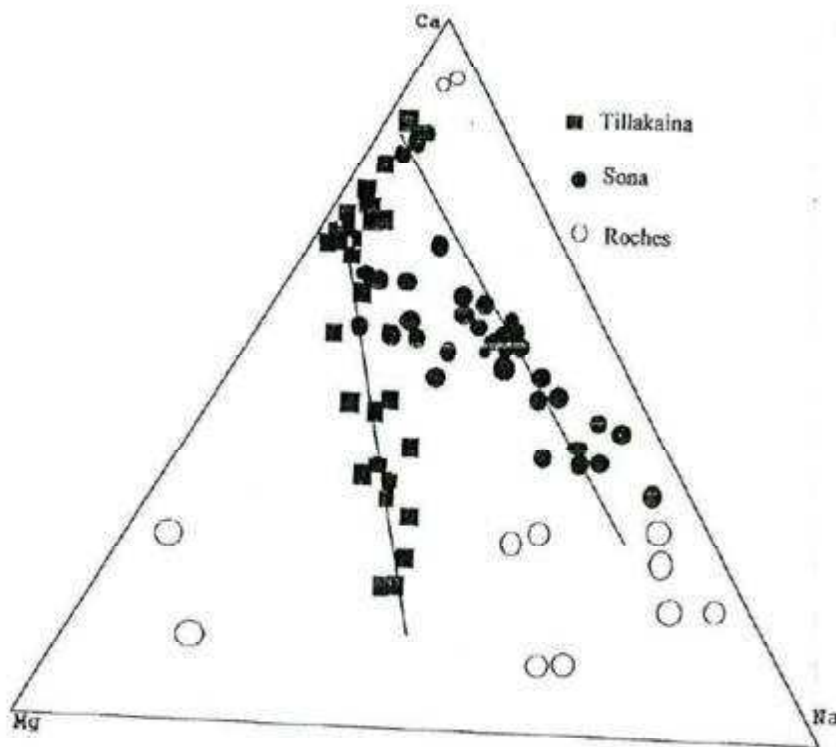


Fig. III.6 : Distribution relative des cations échangeables dans les sols de la terrasse T3 (Sona et Tillakaina)

Les valeurs du Na/T (tableau III.6) sont peu élevées en surface et fortes dans les horizons de profondeur. Toutefois, les taux de Na⁺ à Sona sont 2 fois plus élevés que ceux de Tillakaina.

Tableau III.6 : variation Na/T et Mg/T (%) dans les sites.

Paramètre	Site	Surface	Profondeur
Na / T %	Tillakaina	0,50 - 2	18 - 32
	Sona	2,50 - 14	22 - 60
	Kollo	< 1	< 1
Mg / T %	Tillakaina	24 - 27	28 - 43
	Sona	12 - 34	6 - 15
	Kollo	35 - 63	26,7 - 32, 6

Le rapport Mg/T a un comportement divergent à Tillakaina et Sona : les valeurs les plus élevées s'observent en surface à Sona alors qu'elles augmentent avec la profondeur à Tillakaina.

Une carte d'isoteneurs de Na/T est aussi esquissée selon le même transect que l'argile totale (fig. III.7). En rapprochant les figures III.5 et III.7, on constate que les deux éléments présentent des distributions différentes. Le sodium augmente régulièrement avec la profondeur.

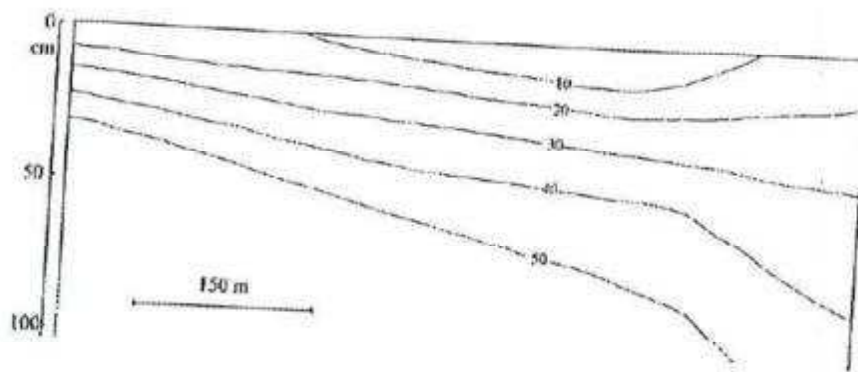


Figure III.7 : Carte d'isoteneurs de Na/T à Sona.

III.2.4 - Conclusion

Une des premières manifestations morphologiques de la dégradation des sols en milieu sahélien concerne la stabilité de la structure et la formation d'encroûtements superficiels.

Dans les sols de la terrasse T3 de Tillakaina et de Sona, ces caractéristiques sont présentes aussi bien sur les périmètres qu'en milieu naturel. L'horizon de surface passé, la structure devient polyédrique grossière, le plus souvent massive. Ce changement de structure a une répercussion essentielle sur la pénétration de l'eau. A Sona par exemple, le front d'humectation ne dépasse pas 50 cm en moyenne, et est en relation avec le taux d'argile.

Par ailleurs, des taches d'oxydo-réduction de fer, marqueurs d'une hydromorphie temporaire de longue durée (Pickering et Veneman, 1984 ; Zobeck et Ritchie, 1984 ; Fransmeier *et al.*, 1983 ; Vizier, 1983 ; Vepraskas et Wilding, 1983 ; Simonson et Boersma, 1972 ; Thorp et Gamble, 1972 ; Latshaw et Tompson, 1968) se développent pratiquement dans tous les profils. Il est peu concevable d'attribuer ces taches à une hydromorphie actuelle d'autant qu'elles possèdent des teintes pales et délavées. Il s'agirait plutôt d'une paléhydromorphie témoignant d'une dynamique hydrique ancienne sous la dépendance d'une nappe phréatique. La répartition de l'ion sodium dans les profils serait elle-même liée au régime hydrique (Kurst, 1988). Les nodules calcaires, dont l'âge varie de 4000 à 7000 ans B.P (Taupin, 1990 ; Taupin *et al.*, 1991), témoigneraient également de cette dynamique ancienne. La mise en eau actuelle des périmètres provoquerait le réveil de cet héritage, en particulier la remobilisation du sodium.

Dans les sols de la terrasse T4 à Kollo, la nappe phréatique est présente marquée par des taches d'oxydoréduction du fer vives. L'hydromorphie est ici fonctionnelle.

Sur le plan géochimique, les différences entre les sols des deux niveaux de terrasses sont également très marquées.

A Tillakaina et Sona, La réaction du sol est neutre en surface et devient alcaline dans les horizons profonds en T3.

A Kollo par contre, le pH est acide sans pour autant atteindre les valeurs des sols sulfatés acides (Loyer, 1989). Il varie peu avec la profondeur.

Les valeurs de CEC obtenues sur la terrasse T3 sont comparables à celles des sols de la partie aval de la toposéquence de Garango II au Burkina Faso (Boulet, 1984), des sols bruns eutrophes des bassins versants des Volta (Burkina Faso) (Kaloga, 1970) et du bassin du lac Tchad (Beavington, 1978). Toutefois celles de Tillakaina sont plus élevées.

Rapprochés des sols alluviaux du sud-ouest du Burkina (Zombré, 1984), les sols de la moyenne terrasse nigérienne affichent une CEC supérieure.

Il est également essentiel de rappeler les différences de la garniture cationique dans les sols de la terrasse T3, Tillakaina et Sona. Si les horizons profonds sont sodiques dans les sols des deux périmètres, ils sont plus magnésiens à Tillakaina qu'à Sona. L'explication de ce fait est à mettre en relation avec l'environnement géologique ; à Tillakaina, il existe des roches magnésiennes, alors qu'à Sona, ce sont principalement des granodiorites riches en feldspaths. Le contexte géologique local jouerait donc un rôle essentiel sur la garniture cationique du complexe d'échange.

La bonne corrélation entre la capacité totale d'échange et les teneurs en argile dans les sols de la terrasse T3 laissent penser que les échangeurs sont de même nature mais avec des teneurs différentes entre les deux sites. Le site de Tillakaina renfermerait plus d'argile de type smectite.

Les sols des terrasses T3 et T4, texturalement peu différents, s'opposent cependant très nettement par la nature de leur complexe d'échange et leur fonctionnement hydrique. Leur garniture ionique est dominée par le magnésium à Tillakaina et par le sodium à Sona. Elle concorde avec les teneurs de ces mêmes éléments dans les matériaux rocheux et altéritiques des sites respectifs.

En résumé, les horizons de surface, présentant le plus souvent des encroûtements, ont les taux les plus faibles de Na avec des pH proches de la neutralité. Les horizons sous-jacents, où la structure tend à être massive, sont sodiques à Sona, et sodiques et magnésiens à Tillakaina. Il apparaît une bonne concordance entre l'organisation morphologique et la distribution du sodium sans qu'il y ait pour autant une superposition des distributions spatiales de l'argile granulométrique et du cation. Cependant, l'étude de la texture a mis en évidence la prédominance du plasma argileux qui, dans ces sols pauvres naturellement en matière organique, devra jouer un rôle central dans le fonctionnement des sols. Il est donc intéressant de chercher la place des minéraux argileux dans l'organisation des différents sols. En plus de la quantité, la nature des argiles contrôle la structuration des sols dans des environnements ioniques donnés.